

Untersuchungen des Einflusses von Wald auf die Schallausbreitung

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Joseph Feng
geb. in Taiwan

von der Fakultät V — Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht
Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. habil. Jörn Sesterhenn
Gutachter: PD Dr. rer. nat. Klaus Ehrenfried
Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Robert Sausen

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 13.11.2015

Berlin 2016
D 83

Kurzfassung

Die akustische Wirkung von Wald auf die Umgebung setzt sich aus verschiedenen Effekten, wie z. B. Reflexion, Absorption und Streuung der Schallwellen (direkte Effekte) sowie Veränderung der Ausbreitungsbedingungen (indirekte Effekte), zusammen. Die Bestimmung der Walddämpfung erfordert deshalb eine genaue Untersuchung der Beschaffenheit des Waldbestandes und der Ausbreitungsbedingungen. In der vorliegenden Arbeit werden erstmals die vorgenannten Effekte durch eine Kombination aus Messungen und numerischen Verfahren einzeln quantifiziert und somit der gesamte Dämpfungseffekt des Waldes bestimmt.

Ausgehend von Zugvorbeifahrten an einem Fichtenwald wird die Gesamtdämpfung von 29 dB in 100 m bei Mitwind messtechnisch festgestellt. Die Zusatzdämpfung (engl. excess attenuation) des Waldes, bezogen auf eine Vergleichsstrecke ohne Wald, beträgt 13 dB. Damit stellt der Wald eine beachtliche Dämpfung im Vergleich zu der gleichzeitig erfassten Gegenwind-Dämpfung (gegenüber Mitwind) von 10 dB dar.

Zur Unterscheidung einzelner Dämpfungseffekte werden neben einem Atmosphärenmodell drei weitere Modellansätze verfolgt. Mit einem LE-Modell werden Detailstudien an hoch aufgelösten Baummodellen durchgeführt. Weiterhin erweitert ein eigenentwickeltes Schallpartikelmodell die Untersuchung auf ein Waldstück. Auf Basis dieser zwei Studien wird in dem dritten Modellansatz die Schallausbreitung im ganzen Waldgebiet berechnet, um die Messung zu reproduzieren und die einzelnen Dämpfungseffekte zu quantifizieren.

Die Modellstudien beweisen die Dämpfungsabhängigkeit von der Volumendichte eines Baumes bzw. eines Waldes. Des Weiteren wird gezeigt, dass unter den untersuchten Ausbreitungsbedingungen die direkten Waldeffekte eine Zusatzdämpfung von über 12 dB und die indirekten lediglich 1 dB betragen.

Eine der Besonderheiten dieser Arbeit liegt darin, die Dämpfung sowohl im Stamm- als auch im Kronenbereich zu bestimmen. Es wird nachgewiesen, dass die Baumkrone die Dämpfung gegenüber dem Stamm um bis zu 1.4 dB erhöht. Eine volumenbezogene Parametrisierung der Baumdämpfung wird abgeleitet, welche eine Analogie für die Walddämpfung aufweist. Diese Parametrisierung ermöglicht eine Modellierung der Dämpfung, welche über die bisher in der Literatur übliche Betrachtung der Stammdichte hinausgeht und die Unterschiede verschiedener Waldarten berücksichtigt.

Abstract

The acoustical influence of a forest on the surroundings consists of different physical phenomena, e.g. reflexion, absorption and scattering of the sound waves (direct effects) as well as changes on the propagation conditions (indirect effects). The determination of the damping of a forest requires therefore a detailed investigation of the forest properties and propagation conditions. In this study, the aforementioned effects are individually quantified for the first time by means of both measurements and numerical methods. As a result, the total forest damping effect can be identified.

On the basis of the measurement of passing trains by a spruce forest, the total damping of 29 dB in 100 m is determined in downwind. The excess attenuation compared to the reference measurement in the open field is 13 dB. This is a considerable value in comparison to the damping due to upwind (against downwind) of 10 dB.

For the purpose of identifying the single damping effects, three acoustical models are applied in addition to a meteorological model. A detailed study with tree approaches in high resolution is performed by means of a LE-model. Furthermore, a sound particle model is developed und used in analyses of a forest piece. Based on these two studies, the third approach is carried out to calculate the sound propagation for the whole forest, in order to reproduce the measurement and to quantify the single damping effects.

These models demonstrate the dependence of the damping on the volume density of a tree or a forest. Moreover, it is shown that the direct forest effects result in an excess attenuation of over 12 dB and the indirect one only 1 dB.

One of the achievements of this work is the determination of the damping in the stem region as well as the canopy. It is proved that the damping of a tree with canopy can be up to 1.4 dB higher compared to only the stem. A volume specific parameterisation of the tree damping is derived which reveals an analogy to the forest damping. This parameterisation allows a modelling of damping which goes beyond the consideration of the stem density in the most previous studies and takes the difference between various forest species into account.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
1.1. Problemstellung	1
1.2. Stand des Wissens	2
1.3. Forschungsaufgaben	5
1.4. Ziele und Vorgehensweise	5
2. Methodische Grundlagen	7
2.1. Theoretische Betrachtung	8
2.1.1. Grundlegende Gleichungen für diese Arbeit	8
2.1.2. Einflüsse während der Schallausbreitung im Freien	10
2.1.3. Einflüsse während der Schallausbreitung im Wald	16
2.1.4. Praktische Handhabung der Dämpfungsprozesse	19
2.2. Feldexperiment	20
2.3. Modell-Rechnungen	21
3. Einfluss von realen und idealisierten Bäumen auf die Schallausbreitung	25
3.1. Konfiguration der Simulationen	26
3.1.1. Simulation mit realen, lasergescannten Bäumen	28
3.1.2. Simulation mit baumähnlichen Strukturen	29
3.1.3. Simulation mit idealisierten Baumstrukturen	31
3.2. Rechenergebnisse	32
3.2.1. Schalluntersuchung mit realen, lasergescannten Baumstrukturen .	37
3.2.2. Schalluntersuchung mit baumähnlichen Strukturen	38
3.2.3. Schalluntersuchung mit idealisierten Baumstrukturen	39
3.3. Vergleich der Ergebnisse	41
3.4. Fehlerbetrachtung	44
4. Einfluss von idealisierten Waldstreifen auf die Schallausbreitung	47
4.1. Konzept und Konfiguration	48
4.2. Sensitivitätsanalyse auf Waldparameter	51
4.2.1. Schalluntersuchung hinsichtlich der Walddichte	51
4.2.2. Schalluntersuchung hinsichtlich der Waldtiefe	53
4.2.3. Schalluntersuchung hinsichtlich des Reflexionsgrades	54
4.3. Diskussion	55
5. Feldexperiment mit Geräuschen von Zugvorbeifahrten	59
5.1. Versuchsaufbau und -durchführung	60
5.2. Datenerfassung	62

5.3.	Auswertung	69
5.3.1.	Plausibilität und Auswahl der akustischen Messdaten	70
5.3.2.	Korrektur hinsichtlich unterschiedlicher Höhen	71
5.3.3.	Normierung hinsichtlich unterschiedlicher Entfernungen	71
5.3.4.	Bestimmung der Ausbreitungsdämpfung und Zusatzdämpfung	74
5.4.	Mögliche Messfehler	76
5.5.	Vergleich der Ergebnisse mit Literaturangaben	77
6.	Berechnung indirekter Waldeffekte am Beispiel des Feldexperiments	81
6.1.	Konfiguration der Simulationen	82
6.1.1.	Simulation der Meteorologie	82
6.1.2.	Simulation der Akustik	84
6.2.	Rechenergebnisse	85
6.2.1.	Reproduktion der Messsituationen	85
6.2.2.	Schalluntersuchung hinsichtlich des Bodens	95
6.2.3.	Schalluntersuchung hinsichtlich der Meteorologie	95
6.2.4.	Schalluntersuchung hinsichtlich des Waldes	100
6.3.	Vergleich der Ergebnisse	101
6.3.1.	Vergleich der Messung und der numerischen Reproduktion	102
6.3.2.	Vergleich der Simulationen unter modifizierten Ausbreitungsbedingungen	104
6.4.	Fehlerbetrachtung	105
7.	Berechnung direkter Waldeffekte am Beispiel des Feldexperiments	109
7.1.	Konfiguration der Simulationen	110
7.2.	Rechenergebnis	113
7.3.	Diskussion	113
8.	Schlussfolgerungen und Ausblick	117
8.1.	Wesentliche Ergebnisse	117
8.2.	Offene Fragen	119
8.3.	Ausblick	119
A.	Berechnung der Schalldämpfung durch Bodenreflexion	121
B.	Messwerte im Feldexperiment	123
C.	Numerisch reproduzierte Wind- und Schallfelder	129
	Symbolverzeichnis	135
	Abbildungsverzeichnis	139
	Tabellenverzeichnis	143
	Literaturverzeichnis	145

1. Einführung

1.1. Problemstellung

“Wie man in den Wald hinein ruft, so schallt es auch heraus.” Dieses alte deutsche Sprichwort weist darauf hin, dass der Wald eine akustische Wirkung hat. Mit diesem weitbekannten Phänomen geht einher, dass der Wald in gewissem Maße die Transmission von Geräuschen abschwächt. Im Zusammenhang mit stets steigender Belastung der Verkehrsgeräusche stellt sich die Frage, ob ein Wald zum Zweck des Schallschutzes einsetzbar ist.

Als passive Schallschutzmaßnahmen gegen bodengebundene Verkehrsgeräusche dienen üblicherweise Schallschutzwälle und -wände. Schon seit den siebziger Jahren, Reethof (1973) und Kragh (1979), wurde die Möglichkeit vorgestellt, Wälder zum Zweck des Schallschutzes einzubeziehen. Weitere Beispiele sind Anwendungen für Schießanlagen (Swearingen und White, 2007) sowie für Industriegelände (Pal et al., 2000). Neben dem Schallschutz verfügen Wälder zusätzlich über eine Filterfunktion hinsichtlich des Staubs und beeinträchtigen nicht das Landschaftsbild.

Ein Waldstück kann einerseits Turbulenzen bei Wind induzieren und damit Geräusche erzeugen (Fégeant, 1999; Bolin, 2009) und andererseits die Ausbreitung anthropogen verursachter Geräusche in verschiedenste Weise beeinflussen und so die Immission reduzieren (Pal et al., 2000; Van Renterghem et al., 2012). Unter letzterem Aspekt befasst sich die vorliegende Arbeit.

Über die Wirkung von Wald auf die Schallausbreitung gab es in früheren Studien verschiedene, teilweise widersprüchliche Aussagen, wie z. B. bei Aylor (1972), Kragh (1981) und Bullen und Fricke (1982). “Welches Waldstück wirkt schalldämpfend, auf welche Weise und um wie viel?” Dies sind Fragen, die heutzutage immer noch nicht beantwortet sind.

Gegenwärtig sind im Regelwerk pauschale, überschlägige Zusatzdämpfungen für einen Wald zu finden. In DIN ISO 9613-2 und VDI 2714 wird der Dämpfungsterm als Funktion der Schallfrequenz und des Schallwegs im Waldstück angegeben, während in der “Vorläufigen Berechnungsmethode für den Umgebungslärm an Schienenwegen” (VBUSch) zur 34. BImSchV ausschließlich der Schallweg im Waldstück einbezogen wird. Eine detaillierte Berücksichtigung über den Waldbestand wäre an dieser Stelle erforderlich, und ebenso über die durch den Wald modifizierten Bodenbeschaffenheiten und Atmosphäre.

Während der Schallausbreitung im Freien werden die Schallwellen mit zunehmender Ausbreitungsentfernung schwächer und verlieren durch die Luftabsorption weiter an Ener-

gie. Gleichzeitig unterliegen diese den Einflüssen meteorologischer und topografischer Beschaffenheit, welche in der Natur eine große Heterogenität aufweisen. Die Schallwellen werden aufgrund der Temperatur- und Geschwindigkeitsgradienten der Atmosphäre gebrochen. Turbulente Wirbel in gut durchmischter Atmosphäre verursachen Streuung. Darüber hinaus werden die Schallwellen vom Boden reflektiert bzw. absorbiert. An diversen Gegenständen am Boden wie z. B. Steinen und Gräsern finden ebenfalls Reflexion, Absorption und Streuung statt. Diese Effekte weisen eine Frequenzabhängigkeit auf, welche besonders zu berücksichtigen ist.

Ein Waldstück ist für die Schallausbreitung in erster Linie ein Hindernis. Die Schallwellen werden an den Bäumen, dem Unterholz und anderer Vegetation im Wald reflektiert, absorbiert, gestreut und gebeugt. Bodenbewuchs und herabgefallenes Laub modifizieren die Bodeneigenschaften. Ferner verändert ein Wald die unmittelbare Atmosphäre, wie z. B. den Wind, die Temperatur und Feuchte, welches zusätzlich die Schallausbreitung beeinflusst. Die Wechselwirkung der oben genannten Effekte kann abhängig von der Beschaffenheit des Waldes beliebig komplex werden.

1.2. Stand des Wissens

Experimentelle Studien

Eyring (1946) lieferte eine der ersten wissenschaftlichen Studien über das Verhalten von Schall im Dschungel. Anhand von Messungen bewies er die Frequenzabhängigkeit der Schallausbreitung im Wald. Zur Klassifizierung unterschiedlicher Waldbestände in akustischer Hinsicht wurde von Eyring die optische Dichte eines Waldes vorgestellt.

In der Arbeit von Embleton (1963) wurde an 20 verschiedenen Waldbeständen im Frequenzbereich unterhalb 2 kHz eine Zusatzdämpfung von 7 dB/(30 m) festgestellt. Im Frequenzbereich zwischen 250 Hz und 1 kHz wurde jedoch bei einigen Baumarten eine Erhöhung des Schallpegels beobachtet. Dies wurde durch die Resonanz der Schallwellen an den Ästen erklärt.

Im Gegensatz dazu fand Aylor (1972) heraus, dass die Arten der untersuchten Waldstücke (ob alt oder jung, natürlich oder aufgeforstet) keinen signifikanten Einfluss auf die Schalldämpfung haben. Maßgebend für die Dämpfung ist laut Aylor die gesamte Blattfläche des betrachteten Waldstücks, insbesondere im hohen Frequenzbereich. Durch systematische Messungen der Böden und Pflanzen wurde festgestellt, dass die Dämpfung im hohen Frequenzbereich der Streuung des Blattwerks zuzuordnen ist und die im tiefen Frequenzbereich den Interferenzen durch die Bodenreflexion.

Reethof (1973) belegte den Zusammenhang zwischen der Walddichte und der Schalldämpfung. Eine Zusatzdämpfung von (5 bis 8) dB/(30 m) im aufgeforsteten Wald und von (3 bis 5) dB/(30 m) im Naturwald wurde ermittelt. Im Vergleich dazu wurde von Kragh (1979) eine Zusatzdämpfung des Waldes von (8 bis 9) dB/(50 m) bzw. von (6 bis 7) dB/(25 m) festgestellt. Jedoch erfolgten in dieser Studie die Messungen bei Gegenwind mit einer Windgeschwindigkeit unterhalb 3 m/s.

Martens (1980) sowie Martens und Michelsen (1981) untersuchten die durch Schallwellen angeregte Schwingung an einzelnen Blättern. Eine Schwinggeschwindigkeit der Blätter von (10^{-5} bis 3×10^{-4}) m/s wurde gemessen, welche ein Tausendstel bis ein Zehntel so gering ist wie die umliegende Luft. In der späteren Studie beschrieben Martens et al. (1985) eine lineare Abhängigkeit der Reflexion von der Blattfläche und der Frequenz. Zudem wurde gezeigt, dass ein frisches Blatt den Schall stärker reflektiert als ein eingetrocknetes Blatt.

In der Arbeit von Price et al. (1988) wurden die Bodeneigenschaften in Wäldern ausführlich untersucht. Messungen, die an demselben Laubwald durchgeführt wurden, zeigten eine deutlich höhere Schalldämpfung im Sommer als im Winter. Verantwortlich dafür sind neben der Belaubung die veränderten Bodeneigenschaften.

Pal et al. (2000) ermittelten aus Messungen an acht verschiedenen Waldstücken eine Zusatzdämpfung von (3 bis 6) dB/(50 m). Die Regressionsanalyse ergab, dass die Dämpfung von der optischen Dichte eines Waldstücks abhängt.

Fang und Ling (2003) erfassten die höchste Angabe der Zusatzdämpfung von 9 dB/(20 m) unter den bisher bekannten Studien, gemessen am Bambusbusch. Die Daten bestanden aus Schallmessungen an 35 Beständen von Wald bzw. Buschholz, mit einer relativ kurzen Messstrecke (20 m) und einer geringen Windgeschwindigkeit (< 2 m/s). Diese Untersuchung kommt zu dem Ergebnis, dass die Büsche, welche dichte Blätter und Äste auf der Höhe des Empfängers (1.2 m) besitzen, stärker den Schall abschwächen gegenüber den hohen, wenig belaubten Bäumen. Außerdem wurde beobachtet, dass die Anordnung der Pflanzen eine wichtige Rolle bei der Dämpfung spielt.

Mit Verwendung von Knallgeräuschen erwiesen Yang et al. (2013) den Nachhall der Krone einzelner Bäume. Der Einfluss des Blattwerks wurde lediglich im hohen Frequenzbereich ($f > 2$ kHz) identifiziert. Unter anderem wurde festgestellt, dass der Streuungseffekt mit zunehmender Umhüllungsfläche der Baumkrone zunimmt.

Modellbasierte Studien

Die Schallausbreitung über bzw. durch ein Waldstück wurde bei Bullen und Fricke (1982) als Diffusionsproblem behandelt. Die Ausbreitung der Schallwellen wurde durch ein Partikelmodell ausgedrückt und der Wald als ein homogenes Medium mit einem unbekannten Streungskoeffizienten und einem unbekannten Absorptionskoeffizienten.

Embleton (1966) und Price et al. (1988) stellten jeweils ein Modell zur Berechnung der Streuung an Baumstämmen vor, welches auf der Theorie mehrfacher Streuung von Twersky (1964) basierte. Die Baumstämmen wurden als Zylinder formuliert, welche durch den Durchmesser und die Schallimpedanz charakterisiert sind.

In der Studie von Huisman und Attenborough (1991) wurde ein Schallpartikelmodell verwendet, welchem ein stochastischer Prozess zugrunde liegt. In diesem Modell wird die Rückstreuung eines Schallpartikels als Funktion der Walddichte und des effektiven Stammdurchmessers formuliert. Durch den Letzteren wird die Frequenzabhängigkeit im Modell beschrieben.

Heimann (2003) berücksichtigte die Durchströmung an idealisierten Baumstämmen im 3-D Feld und berechnete die Schallausbreitung mit einem linearisierten Eulerschen Gleichungssystem, das ebenfalls in der vorliegenden Arbeit verwendet wird. Da sich die Schallemission direkt am Boden befand, wurde der Einfluss des Bodens nicht beachtet. Die zylindrischen Baumstämme wurden als akustisch totalreflektierend betrachtet. Äste und Blätter wurden nicht miteinbezogen.

In der Studie von Swearingen und White (2007) wurde neben dem Baumstamm die Baumkrone berücksichtigt, welche aus mehreren parallel zum Baumstamm positionierten Zylindern besteht. Der Kronenbereich wird durch Dichte (in Anzahl pro Volumen) und Durchmesser der Zylinder parametrisiert. Es stellt sich in der Ausbreitung bei Gegenwind heraus, dass die Baumkrone eine Zusatzdämpfung gegenüber dem Baumstamm bei Frequenzen $f > 400$ Hz verursacht. Jedoch wird diese Zusatzdämpfung bei Mitwind nicht beobachtet.

Wunderli und Salomons (2009) entwickelten ein Ingenieurmodell zur Berechnung der Reflexion an einem idealisierten Waldstück. Die Schallausbreitung wurde mit einer parabolischen Gleichung gelöst. Die Reflexion eines ganzen Waldstücks wird anhand einer einzigen Reihe von Zylindern berechnet, sodass der Rechenaufwand deutlich reduziert wird. Durch die erhöhte Dichte dieser Zylinderreihe wird die Reflexion aus dem Waldinneren simuliert. In der fortführenden Arbeit (Wunderli, 2012) wurde mit Hilfe von Kugeln der Kronenbereich simuliert. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, im Vergleich zu anderen Ansätzen mit ausschließlich Zylindern, dass die Richtcharakteristik der Reflexion bzw. Rückstreuung zur Quelle in Bodennähe besser beschrieben wird.

Zusammenfassung bisheriger Studien

Angelehnt an die vergangenen Studien sind die Waldeffekte in drei Bereiche zu unterteilen:

- a) im tiefen Frequenzbereich (ca. < 1 kHz) trägt maßgebend der Boden im Wald zur Dämpfung bei;
- b) im mittleren Frequenzbereich (ca. 1 kHz bis 3 kHz) spielt die Streuung an den Stämmen und Ästen eine große Rolle;
- c) im hohen Frequenzbereich (ca. > 3 kHz) wird die Dämpfung überwiegend durch die Absorption an dünnen Ästen und Blättern sowie die Absorption der Luft bestimmt.

Diese Informationen beschreiben qualitativ die verschiedenen Waldeffekte. Die einzelnen Anteile der Dämpfung in diesen drei Bereichen sind jedoch noch quantitativ zu bestimmen.

Die o. g. Messungen unterscheiden sich hinsichtlich der Schallemission, der Messkonstellation und der Ausbreitungsbedingungen. Komplexe Bedingungen der Atmosphäre und des Bodens sind meist unvermeidlich, welche jedoch in der Literatur oft nicht ausreichend dokumentiert oder gar vernachlässigt wurden. Die untersuchten Waldbestände umfassen verschiedene Laub-, Nadelwälder und Büsche. Hierbei wurden unterschiedliche Zusatzdämpfungen zwischen dem Minimum von 0 dB/(50 m) (Kragh, 1981) und dem

Maximum von 9 dB/(20 m) (Fang und Ling, 2003) festgestellt. Ein direkter Vergleich der bisher bekannten Dämpfungsangaben miteinander ist in der Literatur nicht gegeben.

Für die Modellierung der Waldeffekte sind bereits verschiedene Ansätze bekannt. Im Großteil der vorgenannten Modellstudien wurde der Stammbereich durch Zylinder ohne Beachtung des Kronenbereichs vereinfacht. In den neusten Studien (Swearingen und White, 2007; Wunderli, 2012) wurde der Kronenbereich durch zusätzliche Zylinder bzw. Kugeln simuliert. Der meteorologische Einfluss von Wald wurde in den Arbeiten von z. B. Heimann (2003) und Swearingen und White (2007) bestätigt. In den meisten anderen Studien wurde dieser Einfluss jedoch nicht berücksichtigt. Der Einfluss des Bodens ist vergleichsweise gut erforscht, siehe z. B. Zwicker und Kosten (1949), Delany und Bazley (1970a), Attenborough (1982, 1988), und Béranger et al. (1997), wobei die Bestimmung der Bodeneigenschaften im Wald sehr aufwändig ist. Hierfür werden üblicherweise Schätzwerte in den Simulationen angenommen.

1.3. Forschungsaufgaben

In den vergangenen Studien liegen über die Walddämpfung keine allgemeingültigen Messwerte vor. Mangels eines standardisierten Messverfahrens variieren die Messkonstellationen und damit auch die Ergebnisse sehr stark. Um die Dämpfungseffekte von Wald in direkte und indirekte Weise sowie diese im Zusammenhang mit den Einflüssen aus der Umgebung zu verstehen, sind weitere Forschungen notwendig. Die Simulation der Walddämpfung erfolgt in erster Linie durch die Modellierung der Baumstämme. Ob und wie stark der Kronenbereich und das Unterholz die Schallausbreitung beeinflussen, bleibt zu klären. Zur Charakterisierung eines Waldes werden verschiedene Parameter wie z. B. die optische Dichte, die Stammdichte (engl. stem areal density), der Stammdurchmesser und der Blattflächenindex (engl. leaf area index) vorgeschlagen. Ob diese die Walddämpfung in Abhängigkeit von dem Waldbestand, der Waldart und der Jahreszeit eindeutig beschreibt, ist bisher unbeantwortet.

Die Forschungsfragen meiner Dissertation lauten somit:

- Wie groß ist der Einfluss des Stamm- und Kronenbereichs von Baum bzw. Wald auf die Schallausbreitung?
- Wie stark ist dieser im Vergleich zu anderen gleichzeitig vorhandenen Einflüssen im Umfeld?
- Gibt es geeignete Parameter, mit deren Hilfe die Walddämpfung mit Berücksichtigung des Waldbestandes bzw. der Waldart modelliert werden kann?

1.4. Ziele und Vorgehensweise

Um die o. g. Fragen zu beantworten, habe ich gezielt Studien durchgeführt, die in den nächsten Kapiteln vorgestellt werden. So werden in Kapitel 2 die Grundlagen über die

Schallausbreitung im Freien und die möglichen Effekte während der Schallausbreitung im Wald erläutert. Zur Untersuchung dieser Effekte werden ein Feldexperiment sowie die verwendeten Modelle vorgestellt.

Um die Walddämpfung zu untersuchen, ist das Verständnis über die Baumdämpfung essentiell wichtig. Hierzu berechne ich mit Hilfe eines linearisierten Eulerschen (LE) Modells dreidimensional die Schallausbreitung an einzelnen Bäumen, welche durch die Laserscanning-Methode detailliert ermittelt wurden, siehe Kapitel 3. Der Modellansatz wird auf idealisierte Baumstrukturen erweitert, um eine allgemeine Charakterisierung von Bäumen zu erhalten. Die (direkten) Dämpfungseffekte in Abhängigkeit von der Frequenz und den Struktureigenschaften der Bäume werden analysiert. Daraus wird eine volumenbezogene Parametrisierung der Baumdämpfung abgeleitet.

Für ein ganzes Waldstück benötigt die Simulation im vorangegangenen Kapitel enorm viel Rechenressourcen. Deshalb entwickle ich in Kapitel 4 ein Schallpartikelmodell, das die Schallausbreitung in einem zweidimensionalen, idealisierten Wald effizient berechnet. Die Dämpfung wird in Abhängigkeit von Waldparametern, wie z. B. Walddiefe, Stammdichte und Stammdurchmesser, untersucht. Hiermit stelle ich eine volumenbezogene Parametrisierung der Walddämpfung fest, welche eine Analogie zu der Parametrisierung der Baumdämpfung aus dem vorangegangenen Kapitel aufweist.

Um die Walddämpfung unter realen Bedingungen zu überprüfen, führe ich ein Feldexperiment über die Schallausbreitung von Zugvorbeifahrten an einem Fichtenwald durch, siehe Kapitel 5. Die Einflüsse dieses Waldes sowie auch die der Umgebung werden durch Vergleichsmessungen analysiert. Die Gesamtdämpfung des Waldes wird ermittelt und, erstmalig in diesem Forschungsbereich, mit verschiedenen Literaturangaben verglichen. Die gleichzeitig erfassten Ausbreitungsbedingungen dienen den folgenden Simulationen als Referenz.

Darauf hin folgt Kapitel 6 mit Rechnungen der (indirekten) Waldeffekte in den Messsituationen. Anhand der gemessenen Feldgrößen werden die Wind- und Schallfelder mit den LE-Modellen reproduziert. Die indirekten Waldeffekte hinsichtlich Atmosphäre und Boden werden anhand einer Sensitivitätsanalyse quantifiziert. Die Rechenergebnisse werden mit den Messergebnissen evaluiert.

Die vorgenannten Rechnungen werden dann in Kapitel 7 um die Modellierung direkter Waldeffekte erweitert. Zur Gestaltung des Waldes wende ich den in Kapitel 3 erprobten Modellansatz mit idealisierten Bäumen an. Die Abhängigkeit der Walddämpfung von der Walddichte wird mittels einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Eine gute Übereinstimmung der Rechenergebnisse mit dem Messergebnis wird erreicht.

Abschließend fasse ich in Kapitel 8 die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit zusammen. Ein Ausblick auf zukünftige Forschungsthemen wird gegeben.

2. Methodische Grundlagen

Im Allgemeinen können Lärmprobleme in drei Stufen eingeteilt werden: Emission, Transmission und Immission. Es handelt sich jeweils um die Entstehung bzw. Abstrahlung, die Ausbreitung und die Wahrnehmung von Geräuschen. Dabei werden die als unerwünscht empfundenen Geräusche mit „Lärm“ bezeichnet und sonst wird von Geräuschen oder Schall gesprochen. Maßnahmen zur Lärm- bzw. Geräuschbekämpfung können in den vorgenannten drei Stufen getroffen werden. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Waldeinfluss zur Geräuschbekämpfung bei der Transmission. Eine kurze Erläuterung über grundlegende Begriffe und Gleichungen der Akustik wird in Abschnitt 2.1.1 gegeben.

Die Schalltransmission bzw. -ausbreitung im Freien ist stark durch die Atmosphäre und den Boden bedingt, wie z. B. die günstige Ausbreitung bei Mitwind oder die schlechte Ausbreitung über einem Gelände mit Neuschnee. Im Vergleich zum offenen Gelände liegen im Wald eine andere Atmosphäre und andere Bodeneigenschaften vor, weshalb eine veränderte Schallausbreitung zu erwarten ist. Des Weiteren werden an der Vegetation die Schallwellen reflektiert, absorbiert, gestreut und gebeugt. Diese physikalischen Prozesse der gesamten Waldeffekte werden in Abb. 2.1 skizziert und in den folgenden Abschnitten 2.1.2 und 2.1.3 im Einzelnen erläutert.

Der Waldeffekt wurde bisher in der Literatur als ein lineares Problem angesehen, da die Wechselwirkungen zwischen den o. g. physikalischen Prozessen nicht bekannt sind. Diese werden in der vorliegenden Arbeit vereinfacht behandelt. Die Gesamtdämpfung von Wald resultiert aus der Summe der o. g. Prozesse. In Anlehnung an DIN ISO 9613-1 wird eine ingenieurmäßige Formel vorgestellt, mit welcher die einzelnen Dämpfungseffekte von Wald identifiziert und quantifiziert werden, siehe Abschnitt 2.1.4.

Um den Waldeffekt zu untersuchen, werden ein Feldexperiment (zur Ermittlung des Gesamteffektes) und numerische Experimente (zur Bestimmung der einzelnen Prozesse) durchgeführt. Diese Werkzeuge werden in Abschnitten 2.2 und 2.3 erläutert.

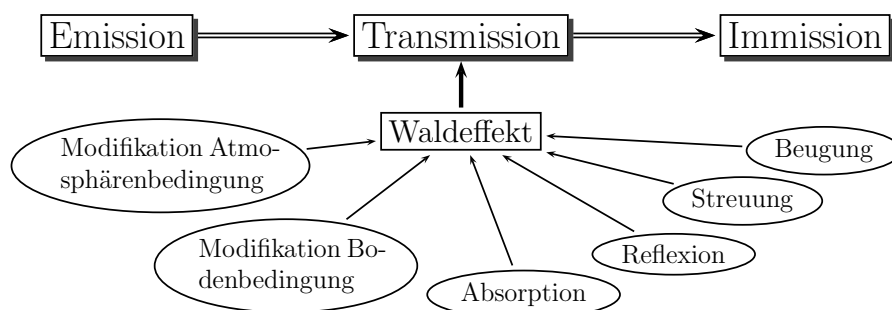


Abb. 2.1.: Skizze über Dämpfungsprozesse der gesamten Waldeffekte

Als Emission werden in dieser Arbeit ebene Wellen (Untersuchungen im Fernfeld, in Kapiteln 3 und 4) und Zugvorbeifahrten (Untersuchungen bezogen auf die Messung, in Kapiteln 5, 6 und 7) gewählt. Der ermittelte Waldeffekt wird als Schalldruckpegel ausgedrückt, bezogen auf eine definierte Entfernung, in dB/m. Die subjektive Wahrnehmung über den Waldeffekt wird in dieser Arbeit nicht behandelt.

2.1. Theoretische Betrachtung

2.1.1. Grundlegende Gleichungen für diese Arbeit

Schwingungen im hörbaren Bereich, zwischen 20 Hz und 20 kHz, werden als Schall bezeichnet. Schall breitet sich wellenförmig mit der Schallgeschwindigkeit c aus, welche von der Lufttemperatur T abhängt, $c = \sqrt{\kappa RT/M}$. Mit κ wird der Adiabatenexponent der Luft gekennzeichnet. Dieser liegt nahe bei 1.4 für trockene Luft unter Normalbedingungen. $R = 8.3145 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ ist die Gaskonstante und $M = 0.02896 \text{ kg/mol}$ die molare Masse der Luft. Bei einer Temperatur von 20°C beträgt die Schallgeschwindigkeit ca. 343 m/s.

Der Schalldruck p kann durch Mikrofone gemessen werden. Aufgrund der Eigenschaft der Schwingung ist der Schalldruck an einem festen Aufpunkt eine Funktion der Zeit $p = p(t)$. Zur Vereinfachung wird der Schalldruck für einen reinen Ton mit der Frequenz f betrachtet, wodurch dieser mit

$$p(t) = \Re\{\hat{p} \cdot e^{i\omega t}\} \quad (2.1)$$

formuliert werden kann. \hat{p} bezeichnet die Amplitude des Drucks und ω die Kreisfrequenz, $\omega = 2\pi f$. Der Konvention in der Literatur folgend wird die Bezeichnung der Realteilbildung in dieser Arbeit weggelassen, sofern nicht darauf hingewiesen wird. Der Effektivwert des Schalldrucks p_{eff} innerhalb einer betrachteten Zeitspanne wird durch den quadratischen Mittelwert bestimmt

$$p_{\text{eff}} = \sqrt{\overline{p^2(t)}} = \sqrt{\frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} p^2(t) dt}, \quad (2.2)$$

wobei die Bezeichnung $\overline{(\quad)}$ die zeitliche Mittelung ($t = 0$ bis t_1) bedeutet. Der Schalldruck wird üblicherweise als dekadisch logarithmische Größe, den Schalldruckpegel L_p , ausgedrückt

$$L_p = 10 \lg \frac{p_{\text{eff}}^2}{p_{\text{ref}}^2}. \quad (2.3)$$

Mit $p_{\text{ref}} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ wird eine Bezugsgröße verwendet, welche als Hörschwelle bei gesunden Menschen identifiziert wurde. Der Schalldruckpegel besitzt die Hilfsmaßeinheit Dezibel (dB).

Die Schallleistung P einer stationär, ungerichtet emittierenden Quelle errechnet sich aus dem Produkt der Intensität I und der betrachteten Fläche S , auf welche sich die Intensität

bezieht. In der Praxis interessiert man sich meist nur für den zeitlichen Mittelwert

$$\bar{P} = \bar{I}S. \quad (2.4)$$

Weit entfernt von der Quelle breitet sich die Front der Schallwellen als Ebene aus. In diesem Fall kann die mittlere Intensität wie folgt vereinfacht werden

$$\bar{I} = \frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho_0 c_0}, \quad (2.5)$$

wobei ρ_0 die Luftdichte bezeichnet und c_0 die Schallgeschwindigkeit in der Luft. Durch das Produkt dieser zwei Größen wird die Schallimpedanz der Luft beschrieben, $Z_0 = \rho_0 c_0$.

Man betrachte die verlustfreie Schallausbreitung aus einem Monopol mit der Leistung P . Während der Ausbreitung verteilt sich die Leistung auf einer immer größer werdenden Kugelfläche. Folglich nimmt die Intensität ab

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}, \quad (2.6)$$

wobei r die Entfernung zur Quelle bezeichnet. Ähnlich wie beim Schalldruck wird die Schallleistung meist in einer logarithmischen Größe L_W mit der Einheit dB ausgedrückt

$$L_W = 10 \lg \frac{P}{P_{\text{ref}}}. \quad (2.7)$$

Hierin beträgt die Bezugsleistung $P_{\text{ref}} = p_{\text{ref}}^2 / (\rho_0 c_0) \cdot 1 \text{ m}^2 = 10^{-12} \text{ W}$. Nach dem Einsetzen der Gl. (2.6) in Gl. (2.7) erhält man eine Beziehung zwischen dem Schallleistungspegel der Emission und dem Schalldruckpegel der Immission

$$L_W = 10 \lg \frac{p_{\text{eff}}^2 / (\rho_0 c_0) \cdot 4\pi r^2}{p_{\text{ref}}^2 / (\rho_0 c_0)} = 10 \lg \left(\frac{p_{\text{eff}}^2}{p_{\text{ref}}^2} 4\pi r^2 \right) = L_p + 20 \lg(r) + 11. \quad (2.8)$$

Anhand der Gln. (2.5) und (2.6) ergibt sich eine umgekehrte Proportionalität des effektiven Schalldrucks zur Entfernung

$$p_{\text{eff}}(r) \sim 1/r. \quad (2.9)$$

Für Fragestellungen bezüglich der Schallausbreitung wird häufig von dieser Gleichung Gebrauch gemacht. Bei einer Linienquelle verteilt sich die Schallleistung, im Gegensatz zu Gl. (2.6), auf einer immer größer werdenden Zylinderfläche. Dadurch ergibt sich $p_{\text{eff}}(r) \sim 1/\sqrt{r}$. Weitere, ausführliche Herleitungen findet man z. B. bei Cremer und Möser (2003) sowie bei Ehrenfried (2002).

In einer Messung wird der Schalldruck nach DIN IEC 60651 bei einer schnellen Zeitbewertung F (engl. fast) im Takt von 0.125 s und bei einer langsamen Zeitbewertung S (engl. flow) im Sekundentakt gemittelt ausgegeben. Die Mittelung von zeitlich bzw. räumlich unterschiedlichen Schallpegelwerten L_i ($i = 1 \dots n$) erfolgt gemäß DIN 45641 durch

folgende Formel

$$L_{\text{eq}} = 10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right). \quad (2.10)$$

Der gemittelte Schallpegel wird als äquivalenter Schallpegel L_{eq} bezeichnet.

Mit Berücksichtigung der frequenzabhängigen Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs wird oft der Schalldruck als A-bewerteter Pegel L_A angegeben. Im mittleren Frequenzbereich (zwischen 1 kHz und 6 kHz) sieht die A-Bewertung eine Erhöhung bezüglich des unbewerteten Pegelwertes vor und in den sonstigen Bereichen ($f < 1$ kHz bzw. $f > 6$ kHz) eine Senkung. Die Korrekturpegel der A-Bewertung hängen sowohl von der Frequenz als auch von dem Schallpegel ab (DIN 45633).

2.1.2. Einflüsse während der Schallausbreitung im Freien

Geometrische Ausbreitung

Die von der Art der Quelle und von der Entfernung abhängige Pegelabnahme wird in DIN ISO 9613-2 als *Dämpfung aufgrund geometrischer Ausbreitung* genannt. Bei einer Punktquelle wird gemäß Gl. (2.9) die Dämpfung zwischen zwei verschiedenen Aufpunkten, $L_{p,1}$ und $L_{p,2}$, wie folgt bestimmt

$$L_{p,2} - L_{p,1} = 10 \lg \left(\frac{p_{\text{eff},2}}{p_{\text{ref}}} \right)^2 - 10 \lg \left(\frac{p_{\text{eff},1}}{p_{\text{ref}}} \right)^2 = 10 \lg \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2, \quad (2.11)$$

mit r_1 und r_2 der Entfernung des jeweiligen Aufpunktes zur Quelle. Analog dazu ergibt sich die Dämpfung zweier Aufpunkte bei einer Linienquelle wie folgt

$$L_{p,2} - L_{p,1} = 10 \lg \frac{r_1}{r_2}. \quad (2.12)$$

Die Pegelabnahme in Abhängigkeit von der Entfernung ist grafisch in Abb. 2.2 dargestellt. Durch die Entfernungsverdoppelung beträgt die Pegelabnahme bei einer Punktquelle 6 dB, da $10 \lg(1/2)^2 \simeq -6$, bei einer Linienquelle 3 dB.

Luftabsorption

Während der Ausbreitung wird die Schallenergie durch die Luftabsorption abgeschwächt. Ursachen dafür sind die Wärmeleitungsvorgänge, Viskosität, Diffusion und die rotationale Relaxation der (mehratomigen) Gase in der Luft sowie die schwingende Relaxation des Stickstoffs und des Sauerstoffs, siehe z. B. Piercy et al. (1977) und Sutherland und Daigle (1997). Diese physikalischen Prozesse werden nach Piercy et al. (1977) in drei Effekten (engl. classical physics, rotational and vibrational relaxation) in Abhängigkeit von der Frequenz zusammengefasst, siehe Abb. 2.3. Zudem wird der Absorptionskoeffizient α_{Luft} von der relativen Feuchte, der Temperatur und dem Druck der Luft beeinflusst. In DIN ISO 9613-1 werden die Formeln und Tabellen zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten (in dB/km) angegeben. Für die in Kapitel 5 bis 7 untersuchten Zugvorbeifahrten

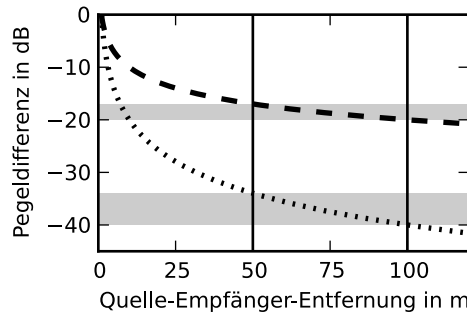


Abb. 2.2.: Dämpfung durch geometrische Ausbreitung in Abhängigkeit von der Entfernung. Die gepunktete Kurve kennzeichnet den Pegelverlauf einer Punktquelle, die gestrichelte Kurve den einer Linienquelle. Die schraffierten Flächen stellen die Pegelabnahme durch eine Entfernungsverdoppelung von 50 m auf 100 m dar.

liegen die dominanten Schallfrequenzen im Bereich von $f < 3$ kHz. Dementsprechend betragen die Absorptionskoeffizienten unter ca. 2 dB/(100 m), siehe Abb. 2.3. Für die Tief- bzw. Mittelfrequenzen ($f < 1$ kHz) betragen die Absorptionskoeffizienten lediglich ca. < 0.8 dB/(100 m).

Bodenreflexion

Die auf den Boden einfallenden Schallwellen dringen teilweise in den Boden ein und werden teilweise reflektiert. Schematisch kann die Reflexion an einem ebenen Boden so dargestellt werden, als gäbe es eine Spiegelquelle im Boden, welche sich in Bezug auf die Erdoberfläche symmetrisch zu der realen Quelle befindet, siehe Abb. 2.4.

Die reflektierten Wellen überlagern sich mit den direkten und rufen Interferenzen hervor. Durch die Höhe der Quelle, die des Empfängers und deren Distanz zueinander ergeben sich verschiedene Weglängen der Ausbreitung r_1 und r_2 sowie verschiedene Ein- bzw. Ausfallswinkel θ . Die reflektierten Wellen werden in Abhängigkeit von der Schallfrequenz unterschiedlich stark abgeschwächt und phasenverschoben.

Die Reflexion wird durch das Verhältnis der Druckamplitude zwischen den einfallenden und den reflektierten Wellen, den Reflexionskoeffizienten R_p , beschrieben. Für einen lokal reagierenden Boden lautet nach Ingard (1951) der Reflexionskoeffizient

$$R_p = \frac{\sin \theta - Z_0/Z_B}{\sin \theta + Z_0/Z_B}, \quad (2.13)$$

mit Z_0 und Z_B jeweils der Schallimpedanz der Luft und des Bodens. Das Schallfeld, welches aus einer Überlagerung der direkten Wellen von der Quelle und der vom Boden reflektierten Wellen besteht, wird nach Rudnick (1947) mittels der Weyl-Van der Pol Gleichung (bekannt aus dem Gebiet von Elektrodynamik) formuliert

$$p(\mathbf{x}, t) = i\rho_0\omega_0 \left\{ \frac{e^{ik_0r_1}}{r_1} + [R_p + F(1 - R_p)] \frac{e^{ik_0r_2}}{r_2} \right\} e^{-i\omega_0 t}, \quad (2.14)$$

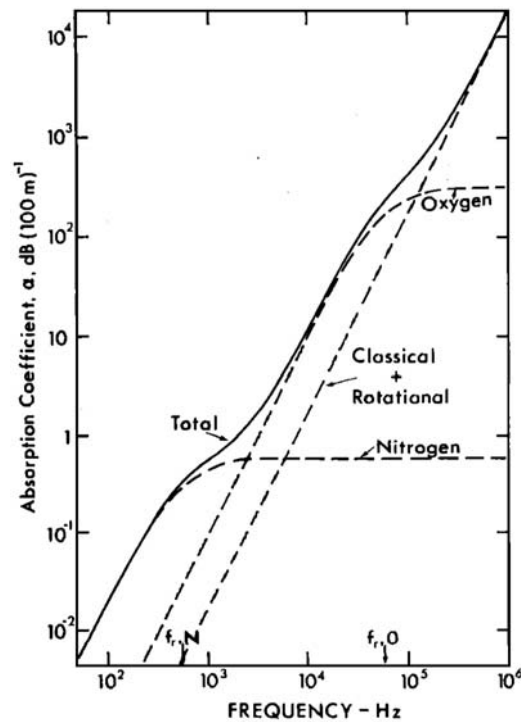


Abb. 2.3.: Absorptionskoeffizient der Luft α_{Luft} in Abhängigkeit von der Frequenz, in 101.3 kPa und 20 °C mit einer relativen Feuchte von 70 %, übernommen aus Piercy et al. (1977). Die involvierten physikalischen Prozesse sind in drei Effekten — die klassischen physikalischen Prozesse und die rotationale Relaxation, die schwingende Relaxation des Stickstoffs und die des Sauerstoffs — zusammengefasst. Die einzelnen Effekte sind jeweils mit einer gestrichelten Kurve bezeichnet und der gesamte Effekt mit einer durchgezogenen Kurve.

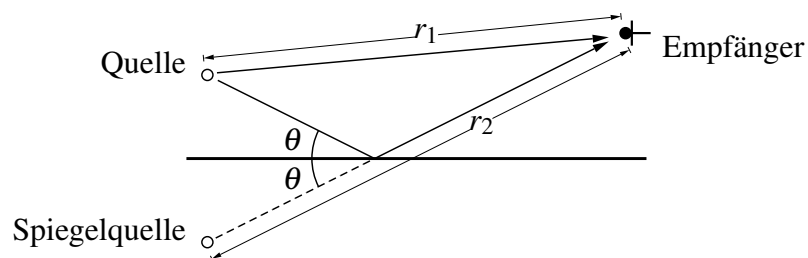


Abb. 2.4.: Skizze der Bodenreflexion. r_1 und r_2 bezeichnen jeweils die Weglänge des direkten bzw. reflektierten Ausbreitungswegs und θ den Einfallswinkel in Bezug auf den Boden.

mit \mathbf{x} dem Ortsvektor und $k_0 = \omega_0/c_0$ der Wellenzahl in der Luft. F stellt einen Verlustfaktor (engl. boundary loss factor) dar und hängt unter anderem von der Impedanz und Wellenzahl des Bodens, Z_B und k_B , ab. Die Bestimmung dieses Faktors wird in Anhang A erläutert.

Delany und Bazley (1970a,b) als auch Chessell (1977) stellen eine empirisch bestimmte Formel zur Bestimmung der Impedanz des Bodens vor

$$Z_B = \rho_0 c_0 \left\{ \left[1 + 9.08 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.75} \right] - i \left[11.9 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.73} \right] \right\}, \quad (2.15)$$

mit σ dem spezifischen Strömungswiderstand des Bodens. Dieser ist definiert als das Verhältnis des Druckgradienten zur Geschwindigkeit der Volumenverdrängung und besitzt die Einheit $\text{kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$, siehe z. B. Zwicker und Kosten (1949), Delany und Bazley (1970a) und DIN EN 29053. Anhand der Gl. (2.15) lässt sich der Reflexionskoeffizient R_p durch einen einzigen Bodenparameter bestimmen.

Die durch die Bodenreflexion verursachte Pegeländerung, bezogen auf den Schallpegel einer Ausbreitung im Freifeld, errechnet sich anhand Gl. (2.14) wie folgt

$$\begin{aligned} A_{\text{Boden}} &= L_{\text{mit Boden}} - L_{\text{Freifeld}} \\ &= 20 \lg \left\{ 1 + [R_p + F(w)(1 - R_p)] \frac{e^{ik_0(r_2 - r_1)}}{r_2/r_1} \right\}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Ein positiver Wert bedeutet eine Pegelzunahme aufgrund der Bodenreflexion und ein negativer Wert eine Pegelabnahme.

Das o. g. Delany-Bazley Modell gehört zu den Bekanntesten im Forschungsgebiet Bodenreflexion. Weitere Bodenmodelle wurden z. B. von Zwicker und Kosten (1949), Attborough (1985) sowie Bérenger et al. (1997) vorgestellt. Bei diesen sind jedoch Kenntnisse über weitere Parameter des Bodens erforderlich, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht bestimmt werden können. Es wird auf eine leichtere Bedienbarkeit geachtet, weshalb das Delany-Bazley Modell verwendet wird. Der dazu notwendige Strömungswiderstand des Bodens wird aus Embleton et al. (1983) entnommen.

Meteorologische Einflüsse

Vertikale Verteilung der Temperatur und Windgeschwindigkeit

Ähnlich wie beim Schadstofftransport in der Luft unterliegt die Schallausbreitung den Einflüssen der Meteorologie. Dies geschieht durch die Variation der Lufttemperatur und des Windes. In der Atmosphäre liegt eine höhenabhängige Temperaturschichtung vor. Unter adiabatischen Bedingungen nimmt die Temperatur T mit zunehmender Höhe z in der Troposphäre ab

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{g}{c_p}, \quad (2.17)$$

mit $g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ der Schwerebeschleunigung und c_p der spezifischen Wärmekapazität unter konstantem Druck. Für trockene Luft gilt $c_p = 1005 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, damit errechnet

sich der trockenadiabatische Temperaturgradient Γ , mit $\partial T / \partial z = -\Gamma \simeq -1 \text{ K}/(100 \text{ m})$. Hier spricht man von einer neutralen Temperaturschichtung.

Wird der unteren Atmosphärenschicht Wärme zugeführt, wie z. B. durch die Wärmestrahlung des Bodens an sonnigen Tagen, so ändert sich die Atmosphärenschichtung im Vergleich zur Ausgangsatmosphäre, $\partial T / \partial z > -1 \text{ K}/(100 \text{ m})$. Ein steigendes Luftpaket, in welchem die physikalischen Prozesse adiabatisch erfolgen, kühlt sich langsamer ab als die umgebende Luft. Somit wird nach Archimedischem Prinzip die steigende Bewegung des Luftpakets begünstigt. In diesem Fall spricht man von einer labilen Atmosphärenschichtung. Wird der unteren Atmosphärenschicht Wärme entzogen, $\partial T / \partial z < -1 \text{ K}/(100 \text{ m})$, so wird die vertikale Bewegung eines Luftpakets erschwert. Solch eine Atmosphärenschichtung wird als stabil bezeichnet. Wenn die Temperatur mit zunehmender Höhe zunimmt, spricht man von einer Temperaturinversion.

Beachtet man die Feuchtigkeit in der Luft, so kann diese bei einer gegebenen Temperaturänderung mehr Wärme aufnehmen bzw. freisetzen im Vergleich zur trockenen Luft. Die Wärmekapazität feuchter Luft ist höher als die der trockenen Luft. Diese wird latente Wärme genannt. Im mitteleuropäischen Raum liegt der feuchtadiabatische Temperaturgradient γ deutlich höher als der trockenadiabatische Temperaturgradient, mit $-\gamma \simeq -0.6 \text{ K}/(100 \text{ m})$.

Ähnlich wie die Temperatur ist das vertikale Windprofil auch von der Atmosphärenschichtung abhängig. Dieses wird durch die Druckkraft, Corioliskraft und die Reibungskraft des Bodens beeinflusst. Für die Entfernungsskala in dieser Arbeit (weniger als 1 km) spielt nur die Reibungskraft eine Rolle. Es handelt sich um die unterste Atmosphärenschicht (Prandtl-Schicht, $z \leq 60 \text{ m}$), in welcher die Windgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe stark abnimmt. Das vertikale Profil der Windgeschwindigkeit lässt sich mit dem logarithmischen Windgesetz formulieren

$$|\overline{\mathbf{u}(z)}| = \frac{u_0}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0}, \quad (2.18)$$

mit \mathbf{u} dem Windvektor und $\kappa = 0.4$ der von Karman'schen Konstante. Die Bezeichnung $\overline{(\)}$ bedeutet die zeitliche Mittelung. u_0 und z_0 kennzeichnen jeweils die Reibungsgeschwindigkeit und den Rauigkeitsparameter. Letztere wird z. B. von Bodenbewuchs beeinflusst.

Einflüsse der Temperatur und Geschwindigkeit auf die Schallausbreitung

Weil die Schallgeschwindigkeit von der Lufttemperatur abhängt, erfolgt die Schallausbreitung in verschiedenen Atmosphärenschichten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. In einer labilen oder neutralen Atmosphäre nimmt die Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe ab. Die Wellenfront des Schalls wird gemäß dem Snelliusschen Gesetz nach oben gebrochen. Dadurch wird die Schallausbreitung in Bodennähe vermindert. Im Gegensatz dazu verursacht eine Temperaturinversion eine mit der Höhe zunehmende Schallgeschwindigkeit. Die Schallwellen werden nach unten gebrochen und die Schallausbreitung in Bodennähe wird begünstigt.

Ferner wird die Schallausbreitung durch den Wind beeinflusst, trotz des großen Unterschieds zwischen der Schallgeschwindigkeit (ca. 340 m/s) und der Windgeschwindig-

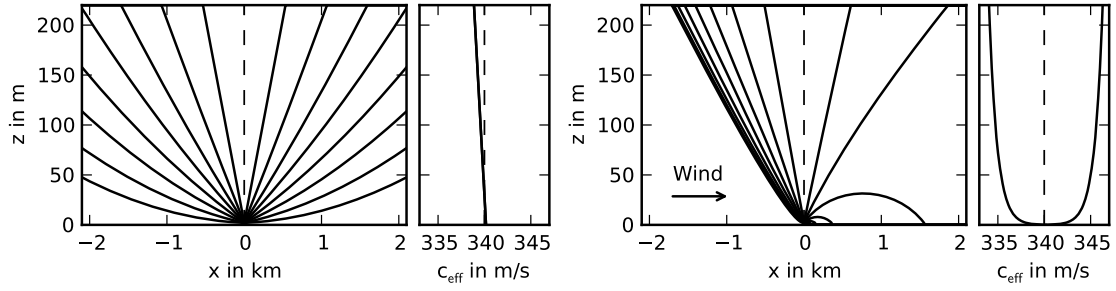


Abb. 2.5.: Verhalten der Schallstrahlen und der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} unter verschiedenen meteorologischen Bedingungen, Vertikalachse überhöht. Links — in neutraler Atmosphäre ($\partial T/\partial z = -1 \text{ K}/(100 \text{ m})$) bei Windstille; rechts — in isothermer Atmosphäre mit Wind ($u_x = 3.4 \text{ m/s}$ in 10 m Höhe). Im rechten Diagramm werden c_{eff} bei Gegen- und Mitwind jeweils links bzw. rechts der gestrichelten Linie dargestellt.

keit (zwischen 1 m/s und 30 m/s in Bodennähe). Die effektive Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls c_{eff} setzt sich aus der Schallgeschwindigkeit in Vektorform \mathbf{c} und dem Windvektor zusammen, $c_{\text{eff}} = |\mathbf{c} + \mathbf{u}|$. Bei Mitwind ist die effektive Schallgeschwindigkeit in einer bestimmten Höhe größer als die in der darunter liegenden Luftschicht (wegen Gl. (2.18)), damit wird der Schallstrahl nach unten umgelenkt. Bei Gegenwind wird der Prozess umgekehrt und der Schallstrahl nach oben umgelenkt.

Betrachtet man den Schall als Partikel mit einem Ortsvektor \mathbf{x} , so wird der Ausbreitungsweg dieses Partikels wie folgt formuliert, siehe z. B. Piercy et al. (1977)

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{c} + \mathbf{u}. \quad (2.19)$$

Hierin gilt $\mathbf{c} = c\mathbf{n}$, mit \mathbf{n} dem Normaleneinheitsvektor des Schallpartikels. Da die Schallgeschwindigkeit c eine Funktion der Temperatur ist, wird Gl. (2.19) durch den Temperaturgradienten der Atmosphäre beeinflusst. Nach dem Eikonal-Fermatschen Prinzip lässt sich die Ausbreitungsrichtung der Wellenfront in Abhängigkeit von der Zeit wie folgt bestimmen

$$\frac{d\mathbf{n}}{dt} = -\nabla c - \sum_{i=1}^3 n_i \nabla u_i. \quad (2.20)$$

Dabei bezeichnet ∇ den Nabla-Operator und $i = 1, 2, 3$ jeweils die x -, y - und z -Koordinate im kartesischen Koordinatensystem. u_i ist die skalare Komponente der Windgeschwindigkeit. Abb. 2.5 zeigt eine schematische Darstellung der Gln. (2.19) und (2.20). Hierin sind jeweils ein Beispiel für den Einfluss der Temperaturschichtung (links) und eins für den Einfluss der Windgeschwindigkeit (rechts) gegeben.

Unter der Annahme konstanter vertikaler Gradienten der Schallgeschwindigkeit $\partial c_{\text{eff}}/\partial z$ und der Windgeschwindigkeit $\partial u_h/\partial z$ beschreibt die Trajektorie des Schallpartikels einen Kreis, mit u_h der horizontalen Komponente der Windgeschwindigkeit. Der Krümmungsgrad des Kreises Ω wird wie folgt bestimmt

$$\Omega = \frac{c(1 + u_h/c)^2}{\partial c/\partial z + \partial u_h/\partial z}. \quad (2.21)$$

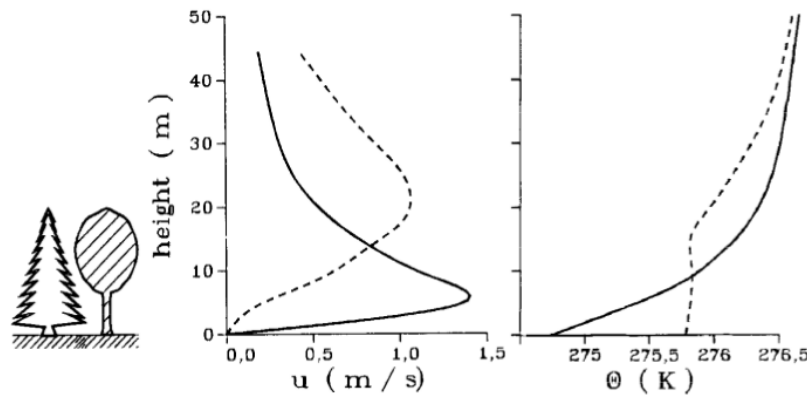


Abb. 2.6.: Waldeinflüsse auf die Windgeschwindigkeit u und die (potenzielle) Lufttemperatur Θ , übernommen aus Groß (1987). Die Bäume links zeigen symbolisch die Waldhöhe. Gestrichelte Kurven — Verteilung der angezeigten Größen im Wald; durchgezogene Kurven — Verteilung der angezeigten Größen nach der Abforstung.

2.1.3. Einflüsse während der Schallausbreitung im Wald

An einem Waldstück werden die o. g. Ausbreitungsbedingungen modifiziert. Denn im Vergleich zum offenen Gelände liegen im Wald eine andere Temperatur, Feuchtigkeit und ein anderes Windfeld sowie andere Bodeneigenschaften vor, siehe z. B. Groß (1987) für den Einfluss auf die Atmosphäre (Abb. 2.6). Somit werden die Einflüsse der Luftabsorption, der Bodenreflexion und der Meteorologie auf die Schallausbreitung verändert, siehe z. B. Price et al. (1988), Huisman und Attenborough (1991), Heimann (2003) und Van Renterghem et al. (2012). Diese werden als *die indirekten Effekte* des Waldes bezeichnet. Ferner können Bäume und Büsche sowie Bodenbewuchs Reflexion, Absorption, Streuung und Beugung der Schallwellen hervorrufen, welche als *die direkten Effekte* des Waldes bezeichnet werden. Diese physikalischen Prozesse werden im Folgenden weiter erläutert.

Es kommt zur Reflexion, wenn die auf ein Hindernis einfallenden Wellen in der gleichen Wellenfront zurückgestreut bzw. reflektiert werden. Wenn die zurückgestreuten Wellen eine andersartige Wellenfront annehmen, oder auch wenn diese durch eine raue Reflexionsfläche keine eindeutige Wellenfront bilden, spricht man von Streuung. Der nicht reflektierte Anteil der Wellen dringt in das Hindernis ein und verliert durch thermoviskose Prozesse die Energie. Dies wird Absorption genannt. Mit Beugung beschreibt man das Phänomen, dass die Wellenfront in Richtung der Schattenzone umgelenkt wird. Hierbei bezeichnet die Schattenzone das durch das Hindernis abgeschirmte Gebiet, welches der Schall nicht erreichen könnte, wenn dieser sich als geradliniger Strahl ausbreiten würde. Ausführliche Grundlagen über diese Prozesse findet man z. B. bei Morse und Ingard (1968) und Fahy (2001). Streuung, Reflexion und Beugung sind unterschiedliche Bezeichnungen über die involvierten akustischen Prozesse am Hindernis (Morse und Ingard, 1968), wobei der Übergang zwischen diesen nicht klar definiert ist. Zum Unterscheiden wird üblicherweise eine charakteristische, dimensionslose Größe aus der Wellenzahl k und der Ausdehnung des Hindernisses a verwendet, die Helmholtz-Zahl $ka = 2\pi a/\lambda$. Dabei bezeichnet λ die Wellenlänge. Bei $ka \ll 1$ breiten sich die Schallwellen um das

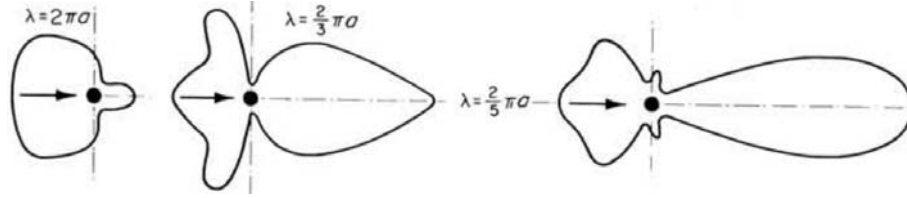


Abb. 2.7.: Intensitätsverteilung der Streuung von ebenen Wellen am Zylinder, übernommen aus Morse und Ingard (1968). Die Pfeile kennzeichnen die Richtung der einfallenden Wellenfront und der Punkt den Querschnitt eines Zylinders. Links — $ka = 1$; Mitte — $ka = 3$; rechts — $ka = 5$.

Hindernis herum nahezu ungestört aus; nimmt ka zu, spielt zunehmend Streuung eine Rolle; bei $ka \gg 1$ treten Reflexion, Absorption und Beugung auf.

Vor der Untersuchung hinsichtlich der Schallausbreitung im ganzen Waldstück werden zuerst die akustischen Prozesse an einem einzigen Baum betrachtet. Hierzu wird das Auftreffen von ebenen Wellen auf einen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung positionierten Zylinder angenommen, welcher einen Baumstamm simuliert. Der Zylinder besitzt eine unendlich lange Ausdehnung in z -Richtung und einen Radius a . Die Oberfläche des Zylinders wird als totalreflektierend angenommen. Ein beliebiger Aufpunkt wird mit $\mathbf{x}(r, \phi)$ im zylindrischen Koordinatensystem ausgedrückt, wobei r die Entfernung zwischen dem Aufpunkt und dem Mittelpunkt des Zylinders bezeichnet und ϕ den Streuwinkel in Bezug auf den einfallenden Schallstrahl. Der Reflexionsgrad der Rückstreuung β lässt sich aus dem Verhältnis der rückgestreuten Intensität I_R zu der Einfallenden I_E berechnen, $\beta = I_R/I_E$. In einer ausreichend großen Entfernung zum Zylinder ($kr \gg 1$) wird der Reflexionsfaktor R_p nach Morse und Ingard (1968) mit der folgenden Annäherung beschrieben

$$R_p(r, \phi) = \frac{1}{\pi k r} \left| \sum_{m=0}^{\infty} \xi_m \sin(\gamma_m) e^{-i\gamma_m} \cos(m\phi) \right|^2, \quad (2.22)$$

wobei der Phasenverschiebungswinkel γ_m wie folgt bestimmt wird

$$\gamma_m \simeq \begin{cases} ka - \frac{\pi}{2}(m + \frac{1}{2}) & \text{für } ka \gg m + \frac{1}{2} \\ \frac{\pi m}{(m!)^2} \left(\frac{ka}{2}\right)^{2m} & \text{für } ka \ll m + \frac{1}{2}. \end{cases} \quad (2.23)$$

Für die Koeffizienten gelten $\xi_0 = 1$ und sonst $\xi_m = 2$ für $m \geq 1$. In Abb. 2.7 wird die Verteilung der gestreuten Intensität am Zylinder gemäß der Gl. (2.22) grafisch dargestellt. Die Pfeile kennzeichnen die Richtung der einfallenden Wellenfront. Mit zunehmendem ka in dem betrachteten Wertebereich, von links nach rechts in der Abb. 2.7, nimmt die Streuung zu und die Intensitätsverteilung zeigt ganz unterschiedliche Konturen.

Für kugelförmige Wellen (aus einer Punktquelle) wurde von Wunderli und Salomons (2009) eine Annäherung für den Reflexionsfaktor vorstellt

$$R_p(r, \phi) = \left[\sum_{m=0}^{\infty} \xi_m \cos(m\phi_n) (-i)^m H_m^{(1)}(kr) \frac{J_m'(ka)}{H_m^{(1)'}(ka)} \right]^2. \quad (2.24)$$

Hierin wird für r die Entfernung des Zylinders zur Quelle bzw. zum Empfänger ver-

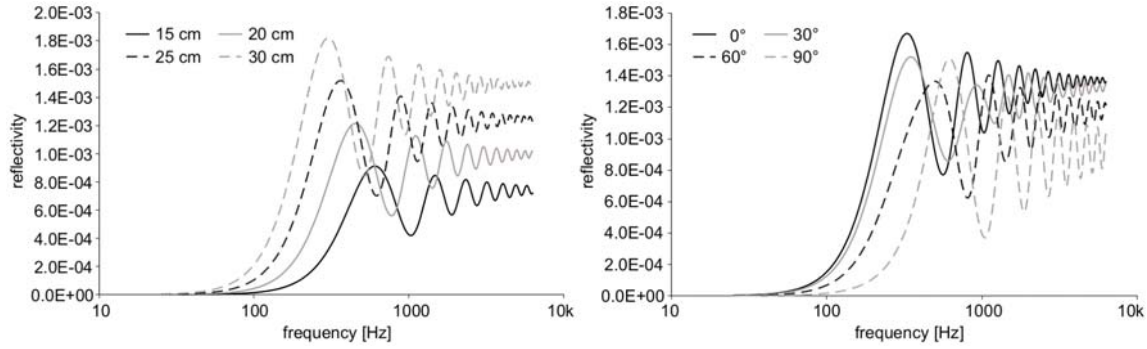


Abb. 2.8.: Reflektionsfaktor R_p der Streuung von kugelförmigen Wellen am Zylinder in Abhängigkeit von der Frequenz, übernommen aus Wunderli und Salomons (2009). Die Entfernung des Zylinders zur Quelle beträgt $r = 50$ m. Links — $\phi = 0^\circ$, mit unterschiedlichen Radien von $a = (15$ bis $30)$ cm; rechts — $a = 27.5$ cm, mit unterschiedlichen Streuwinkeln von $\phi = 0^\circ$ bis 90° .

wendet, welche von denen die geringere ist. $H^{(1)}$ stellt die Hankel-Funktion erster Ordnung dar und J die Bessel-Funktion. Mit dem Strich $()'$ wird die Ableitung der jeweiligen Funktion bezeichnet. In Abb. 2.8 wird gemäß der Gl. (2.24) der Betrag des Reflexionsfaktors gegenüber der Frequenz gezeigt (Wunderli und Salomons, 2009). Für die beiden Diagramme gilt $r = 50$ m. Im linken Diagramm wird der Streuwinkel auf $\phi = 0^\circ$ (Rückstreuung zur Quelle) gesetzt und der Zylinderradius zwischen 15 cm und 30 cm variiert. Mit zunehmendem Zylinderradius nimmt der Reflexionsfaktor zu und das Maximum verschiebt sich in Richtung tiefer Frequenzen. Im rechten Diagramm wird der Zylinderradius auf $a = 27.5$ cm festgelegt. Dies entspricht $ka \simeq 5$ bei $f = 1$ kHz (vergleichbar mit der Abb. 2.7 rechts). Der Streuwinkel ϕ variiert zwischen 0° und 90° . Mit zunehmender Frequenz ($f > 5$ kHz) konvergiert der Reflexionsfaktor bei $\phi = 0^\circ$ gegen 1.4×10^{-3} und bei $\phi = 90^\circ$ gegen 9×10^{-4} . Dies ergibt ein Verhältnis der transversalen Streuung zu der Rückstreuung von 70 %.

In einem Waldstück überlagern sich die an den einzelnen Bäumen gestreuten Wellen in unterschiedlichster Weise. Für den Zweck der Schalldämpfung ist es wichtig den Gesamteffekt des ganzen Waldes zu ermitteln. Dafür kann man von der Streutheorie von Twersky (1952) Gebrauch machen, bei der die Ausbreitung von ebenen Wellen an einer Zylindergruppe behandelt wurde. Eine Approximation für den Dämpfungskoeffizienten, welcher die Dämpfung A_{Wald} in (linearer) Abhängigkeit von dem Schallweg im Wald l_s beschreibt, wird nach Embleton (1966) abgeleitet

$$\frac{A_{\text{Wald}}}{l_s} = W \cdot a \cdot f\left(\frac{Z_s}{\rho c}, ka\right). \quad (2.25)$$

Hierin bezeichnet W die Zylinder- bzw. Stammdichte (in Stämme/m²) und Z_s die Impedanz des Stamms. $f(\frac{Z_s}{\rho c}, ka)$ stellt eine Funktion dar, welche numerisch berechnet wird (siehe Embleton (1966)). Für schallharte Stämme nimmt f mit zunehmender Frequenz monoton zu.

In der Studie von Heimann (2003) wurde unter anderem die Schallausbreitung von ebe-

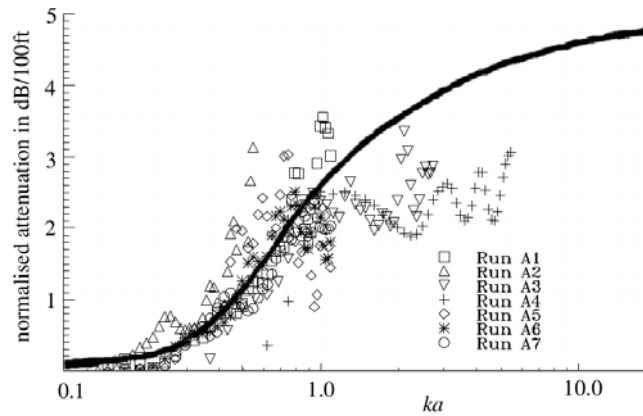


Abb. 2.9.: Vergleich der simulierten und der mit der Streutheorie (Embleton, 1966) berechneten Dämpfungskoeffizienten eines idealisierten Waldes, in Abhängigkeit von ka , übernommen aus Heimann (2003).

nen Wellen am idealisierten Wald (bestehend aus einer Zylindergruppe) numerisch untersucht. Die Dämpfungskoeffizienten aus den Simulationen sind den mit der Streutheorie (Embleton, 1966) berechneten in Abb. 2.9 gegenübergestellt. Die Simulationenläufe von A1 bis A7 unterscheiden sich durch verschiedene Kombinationen von Stammradius a und Stammdichte W . Im Bereich von $ka \leq 1$ stimmen die Ergebnisse gut überein; bei $ka > 1$ werden die Simulationsergebnisse im Vergleich zu den Rechenergebnissen aus der Streutheorie unterschätzt. Der verwendete Akustiklöser *AKU3D* von Heimann (2003) wird in der vorliegenden Arbeit benutzt.

2.1.4. Praktische Handhabung der Dämpfungsprozesse

Gemäß DIN ISO 9613-2 wird die Ausbreitungsdämpfung im Freien als die arithmetische Summe der einzelnen Dämpfungsprozesse behandelt und durch folgende Gleichung beschrieben

$$\begin{aligned} A_{\text{Ges}} &= L_{p,\text{I}} - L_{W,\text{E}} \\ &= A_{\text{Geo}} + A_{\text{Luft}} + A_{\text{Boden}} + A_{\text{Meteo}} , \end{aligned} \quad (2.26)$$

mit

- A_{Ges} der Gesamtdämpfung,
- $L_{p,\text{I}}$ dem Schalldruckpegel am Immissionsort,
- $L_{p,\text{E}}$ dem Schallleistungspegel am Emissionsort,
- A_{Geo} der Dämpfung aufgrund geometrischer Abschwächung,
- A_{Luft} der Dämpfung aufgrund Luftabsorption,
- A_{Boden} dem Einfluss aufgrund Bodenreflexion,
- A_{Meteo} dem Einfluss aufgrund meteorologischer Bedingungen.

Die Dämpfungsterme für Schallverstärkung sind positiv und die für Schallabschwächung negativ. Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten erläutert verändert ein Wald die Ausbreitungsbedingungen, A_{Luft} , A_{Boden} und A_{Meteo} in Gl. (2.26), welche die indirekten Waldeffekte darstellen. Ferner verursacht ein Wald Reflexion, Absorption, Streuung und Beugung von Schall, die direkten Waldeffekte. Es ist naheliegend, dass sich die einzelnen Waldeffekte einander beeinflussen. Die vom Boden reflektierten Schallwellen werden z. B. an der Vegetation wieder reflektiert bzw. absorbiert und umgekehrt. Jedoch sind die Wechselwirkungen wenig erforscht und werden in der Literatur vernachlässigt. Ohne Berücksichtigung der Wechselwirkungen wird Gl. (2.26), im Falle einer Schallausbreitung am Wald, wie folgt modifiziert

$$\begin{aligned} A_{\text{Ges}}^* &= L_{p,I}^* - L_{W,E}^* \\ &= A_{\text{Geo}} + A_{\text{Luft}}^* + A_{\text{Boden}}^* + A_{\text{Meteo}}^* + A_{\text{Wald,dir}}^* \end{aligned} \quad (2.27)$$

Hierbei kennzeichnet der hochgestellte Stern (*) die Terme am Wald. Der letzte Term $A_{\text{Wald,dir}}^*$ bezeichnet die direkten Waldeffekte.

Die Waldeffekte werden üblicherweise durch Zusatzdämpfung (engl. excess attenuation) ausgedrückt, d. h. die durch einen Wald verursachte Dämpfung zusätzlich zu der Ausbreitungsdämpfung im Freien. Diese kann man durch den Vergleich der Gln. (2.26) und (2.27) feststellen. Werden Immissionsorte mit konstanter Ausbreitungsentfernung untersucht, fällt die geometrische Abschwächung A_{Geo} weg. Damit erhält man die Zusatzdämpfung wie folgt

$$\begin{aligned} A_{\text{Ges}} - A_{\text{Ges}}^* &= (L_{p,I} - L_{W,E}) - (L_{p,I}^* - L_{W,E}^*) \\ &= (A_{\text{Luft}} - A_{\text{Luft}}^*) + (A_{\text{Boden}} - A_{\text{Boden}}^*) + (A_{\text{Meteo}} - A_{\text{Meteo}}^*) + A_{\text{Wald,dir}}^*, \end{aligned} \quad (2.28)$$

wobei die ersten drei Terme die indirekten Waldeffekte $A_{\text{Wald,ind}}^*$ darstellen.

In Gl. (2.28) liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit. Die gesamten Waldeffekte, d. h. die Summe von $A_{\text{Wald,ind}}^*$ und $A_{\text{Wald,dir}}^*$, können mit Hilfe eines Feldexperiments ermittelt werden. Dieses unterliegt den topografischen und meteorologischen Gegebenheiten am Messort, welche in ungünstigen Fällen die Waldeffekte überdecken. Des Weiteren ist es aber allein durch ein Feldexperiment nicht möglich, die Effekte im Einzelnen zu identifizieren und quantifizieren. Aus diesen Gründen werden numerische Werkzeuge herangezogen.

2.2. Feldexperiment

Durch ein Feldexperiment wird versucht, die schalldämpfenden Waldeffekte in der Natur nachzuweisen. Dafür stehen vier Schallpegelmesser zur Verfügung, von denen zwei mit einer Messsonde für Meteorologie ausgestattet sind. Als Schallquelle werden Zugvorbeifahrten gewählt, um eine hinreichend hohe, gut identifizierbare Emission zu gewährleisten. Die Ausbreitungsdämpfung zwischen zwei Aufpunkten, jeweils im Nah- und Fernfeld zur Quelle, wird gemessen. Die Entfernung dieser Aufpunkte beträgt 100 m.

Der Messort und Zeitpunkt werden so vorgesehen, dass die sonstigen Ausbreitungsbedingungen (Topografie, Windrichtung etc.) während der Messung möglichst gleich bleiben. Die Messung wird sowohl auf einem offenen Gelände als auch an einem Wald mehrfach wiederholt. Somit werden die Ausbreitungsdämpfungen, $(L_{p,I} - L_{W,E})$ und $(L_{p,I}^* - L_{W,E}^*)$ in Gl. (2.28), ermittelt. Die Waldeffekte werden aus der Differenz der Ausbreitungsdämpfungen in Schalldruckpegel bestimmt, bezogen auf die Ausbreitungsentfernung, in dB/(100 m). Durch das Feldexperiment werden sowohl die direkten als auch die indirekten Waldeffekte gleichzeitig erfasst.

Die Ausbreitungssituationen werden hinsichtlich der Meteorologie und des Bodens dokumentiert. Im Vergleich zu anderen Studien werden in diesem Feldexperiment die meteorologischen Bedingungen genau aufgenommen, um deren Einfluss auf die Schallausbreitung explizit zu untersuchen. Die meteorologischen und akustischen Messdaten dienen gleichzeitig den darauf folgenden numerischen Untersuchungen als Vergleichsbasis.

2.3. Modell-Rechnungen

Zur Voruntersuchung der Waldeffekte wird in dieser Arbeit ein Schallpartikelmodell entwickelt, welches eine effiziente, gut überschaubare Simulation der Schallausbreitung im idealisierten Waldstück ermöglicht. Um weiter die Baumeffekte und die einzelnen Waldeffekte sowie die Schallausbreitung in bestimmten Szenarien zu untersuchen, werden zwei Simulationsprogramme vom *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)* zur Verfügung gestellt, *FITNAH* und *AKU3D*. Das Programm *FITNAH* berechnet dreidimensionale Windfelder im mesoskaligen Gebiet (zwischen 1 km und 100 km); *AKU3D* berechnet die dreidimensionale Schallausbreitung aus einer gegebenen Quelle. Bei der Simulation über einen ganzen Wald, aufgrund der betrachteten Frequenzen (> 3 kHz) und Ausbreitungsentfernung (> 250 m), wird die *AKU3D*-Berechnung im Vertikalschnitt durchgeführt.

Ein Schallpartikelmodell

Um die Effekte von einer Vielzahl von Bäumen zu untersuchen, wird ein 2-D Schallpartikelmodell entwickelt. Hierin wird die strikt geradlinige Fortbewegung von Schallpartikeln berechnet. Beim Aufeinandertreffen auf Hindernisse gilt das Reflexionsgesetz, d. h. Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel. Ein Rechenbeispiel ist in Abb. 2.10 gezeigt, in dem die mehrfache Reflexion veranschaulicht wird. Die Reflexion bzw. Absorption an Baumstämmen werden berücksichtigt. Parameter eines Waldstreifens wie z. B. die Walddichte und -tiefe können mit diesem Modell sehr effizient untersucht werden. Die Ränder des Rechengebiets können als zyklisch, totalreflektierend oder -absorbierend gesetzt werden.

Das Modell *FITNAH*

Das nichthydrostatische Modell *FITNAH* wird verwendet, um die Atmosphäre unter dem Einfluss der Topografie, der Landnutzung sowie der Hindernisse, wie z. B. dem eines Wal-

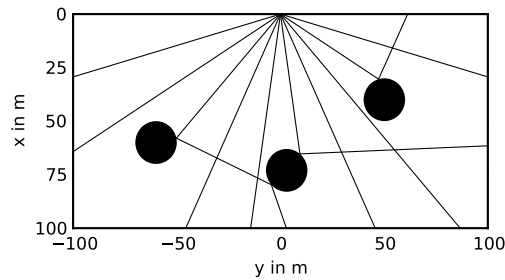


Abb. 2.10.: Beispiel von Schallausbreitung im Schallpartikelmodell im Horizontalschnitt. Die Quelle befindet sich bei $x = 0$ m und $y = 0$ m. Alle Ränder und Hindernisse sind totalreflektierend. Die Kreisscheiben kennzeichnen idealisierte Baumstämme und sind zur besseren Anschaulichkeit übermäßig groß dargestellt.

des, nachzubilden (Groß, 1985, 1987). In diesem Modell wird das prognostische Eulerische Gleichungssystem gelöst, welches aus Massen-, Impuls- und Energieerhaltungsgleichung besteht. Die Massenerhaltungsgleichung wird in anelastischer Form vereinfacht, d. h. $\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$. In der Impulserhaltungsgleichung wird die Dichtevariation vernachlässigt. Für weitere Informationen über dieses Modell wird auf Groß (1993) verwiesen.

In diesem Modell wird ein unterbestimmtes Gleichungssystem für das stationäre Windfeld gelöst. Zu Beginn der Simulation wird von einer ruhenden, geschichteten Atmosphäre ausgegangen. Der vertikale Temperaturgradient im Modell ist je nach der Wetterlage anzunehmen. Die Windgeschwindigkeit in Bodenhöhe wird auf Null gesetzt (engl. non-slip condition). Am oberen Rand des Rechengebiets gilt der geostrophische Wind, welcher frei zuzuweisen ist. Der Druckwiderstand wird in Abhängigkeit von der Landnutzung berücksichtigt. In einem Wald ist dieser proportional zum Luftwiderstandsbeiwert c_d (engl. drag coefficient) und zum Anteil des bewachsenen Waldgebiets n_c . Die an den Aufpunkten gemessenen Feldgrößen wie Druck, Temperatur, Feuchte, Windrichtung und -geschwindigkeit dienen als Richtwerte. Durch Variation des geostrophischen Windes wird eine Annäherung an die gemessenen Winddaten bestimmt und somit das Windfeld für das gesamte Rechengebiet als bekannt angenommen.

Das Modell *AKU3D*

Grundlage des Simulationsprogramms für Schallausbreitung *AKU3D* ist analog zu *FIT-NAH* ein Eulersches Gleichungssystem. Durch die Linearisierung werden die akustisch charakteristischen Größen, die Schallschnelle \mathbf{u}'' und der Schalldruck p'' , von der stationären Größen $\bar{\mathbf{u}}$ und \bar{p} und der strömungsdynamischen Schwankung (\mathbf{u}' und p') getrennt. Eine Finite-Differenzen-Methode im Zeitbereich (engl. finite-difference time-domain method, FDTD) wird verwendet, um das Linearisierte Eulersche Gleichungssystem (LE) zu lösen, siehe Blumrich und Heimann (2002) und Heimann (2003) sowie Blum-

rich und Heimann (2004). Das Gleichungssystem wird wie folgt aufgestellt

$$\frac{\partial \mathbf{u}''}{\partial t} = -(\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \mathbf{u}'' - (\mathbf{u}'' \cdot \nabla) \bar{\mathbf{u}} - \frac{1}{\bar{\rho}} \nabla p'' \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial p''}{\partial t} = -\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla p'' - \kappa \bar{p} \nabla \cdot \mathbf{u}'' . \quad (2.30)$$

Für den oberen und die seitlichen Ränder des Rechengebiets ist eine reflexionsfreie Randbedingung nach Bérenger (1994) implementiert. Zur Berechnung der frequenzabhängigen Bodenreflexion wird die Parametrisierung im Zeitbereich von Heutschi et al. (2005) verwendet. Die akustischen Eigenschaften der Böden werden durch eine einzige Variable, den Strömungswiderstand σ in $\text{kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$, ausgedrückt. Die Oberfläche von Bäumen wird im Rahmen dieser Arbeit als totalreflektierend vereinfacht. Mit diesem Modell können die Schallschnelle und der Schalldruck am beliebigen Ort im Zeitbereich bestimmt werden. Die Anwendbarkeit ist, im Gegensatz zu PE-Modellen (engl. parabolic equation), nicht von bestimmter Geometrie begrenzt. Somit kann die Schallausbreitung auf einem komplexen Gelände bzw. an komplexen Hindernissen wie Bäumen berechnet werden.

3. Einfluss von realen und idealisierten Bäumen auf die Schallausbreitung

In diesem Kapitel wird auf die direkten Effekte einzelner Bäume eingegangen. Diese wurden in den bisherigen, modellbasierten Studien mit idealisierten Baumstämmen untersucht, wie z. B. bei Price et al. (1988) und Heimann (2003). Der Einfluss der Baumkrone wurde erstmals in den Studien von Swearingen und White (2007) und Wunderli (2009), jeweils mit Zylindern bzw. Kugeln, simuliert. Hornikx et al. (2011) präsentierten eine Schallsimulation an einem mittels CAD (engl. computer-aided design) erstellten Baum, wobei in erster Linie ein Fourier PSTD-Modell (engl. pseudospectral time-domain) erprobt wurde.

Im Gegensatz zu den o. g. Studien werden in der vorliegenden Arbeit die Dämpfungseffekte von verschiedenen, dreidimensional hoch aufgelösten Bäumen aus Laserscanning-Messungen untersucht. Neben dem Stamm wird die komplette Baumkrone in die Simulation miteinbezogen. Hierzu wird die Ausbreitung einer ebenen Schallwelle mittels des FDTD-Modells *AKU3D* berechnet. Der Einfachheit halber werden alle Oberflächen des Baums und des Rechengebiets als totalreflektierend angenommen. Dank des verwendeten FDTD-Modells können die Schallreflexion, -streuung und -beugung auch an kleinen Strukturen berechnet werden. Die hierbei berücksichtigten Effekte sind in Abb. 3.1 skizziert. Die Schallreflexion (an der Baumvorderseite) bzw. -transmission (an der Baumrückseite) werden erfasst, um die Effekte verschiedener Baumarten miteinander zu vergleichen.

Des Weiteren werden baumähnliche Strukturen sowie idealisierte Baumstämme und -äste erzeugt, anhand derer die Schallsimulation analog wie oben beschrieben durch-

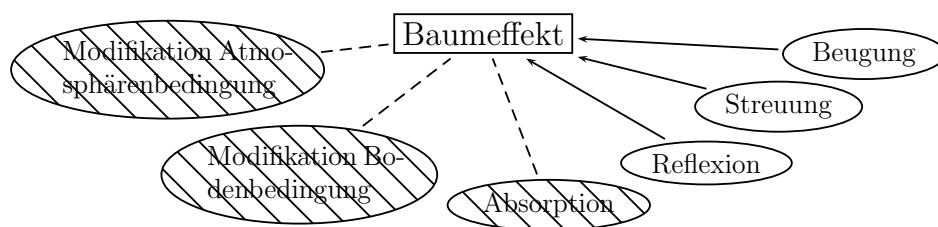


Abb. 3.1.: Skizze über Dämpfungsprozesse der berücksichtigten Baumeffekte. Die nicht miteinbezogenen Effekte sind schraffiert dargestellt.

geführt wird. Diese können Rückschlüsse der akustischen Einflüsse auf bestimmte Baumparameter zulassen. Daraus wird aus der o. g. Versuchsreihe eine Parametrisierung der Dämpfung von einzelnen Bäumen abgeleitet.

Im folgenden Abschnitt wird die Konfiguration der Simulationen erläutert. In Abschnitt 3.2 werden die Auswertung und die Ergebnisse der Simulationen präsentiert. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 3.3 miteinander verglichen, woraus eine Parametrisierung der Dämpfung abgeleitet wird. Zum Schluss werden die möglichen Fehler in den Simulationen diskutiert.

3.1. Konfiguration der Simulationen

Für die Experimente wurde ein Rechengebiet in einer Ausdehnung von $30 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 24 \text{ m}$ (Breite x , Länge y , Höhe z) definiert. Die räumliche Auflösung wurde in x -, y - und z -Richtung gleichmäßig auf 0.05 m festgelegt. Mittig auf der x -Achse des Rechengebiets befand sich das Testobjekt auf dem Grund ($z = 0 \text{ m}$), siehe Abb. 3.2. An $x = 0 \text{ m}$ wurde ein Gaußscher Druckpuls auf der y - z -Ebene angeregt. Die Druckwelle breitete sich mit Schallgeschwindigkeit in positive x -Richtung aus und erreichte das Testobjekt, an dem sie teils reflektiert bzw. gestreut und teils transmittiert wurde. Es ist anzunehmen, dass in diesem kleinen Bereich die meteorologischen Einflüsse auf die Schallausbreitung vernachlässigbar sind. Deswegen wurde ein homogenes, ruhendes Medium in den Simulationen verwendet. Die Ränder in x - und z -Richtung reagieren totalreflektierend. Auf den Rändern in y -Richtung wurde die zyklische Bedingung gesetzt, welche es ermöglichte mit einem einzigen Testobjekt eine Reihe zu simulieren. Über dem Testobjekt bis zum oberen Rand wurde ein Raum vorgesehen, um starke Interferenzen zu vermeiden.

In einem Quader von $8 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 16 \text{ m}$ wurden die Testobjekte räumlich eingegrenzt, wodurch die Untersuchung in einer einheitlichen Skala erfolgen konnte. Es wurden 2 m vor und hinter dem Testobjekt, bezogen auf die Ausbreitungsrichtung der Welle, Aufpunkte in gleichmäßigen Abständen auf der y - z -Ebene positioniert. Die Aufpunkte bildeten zwei Mikrofonarrays in diesem Versuch, an denen die zeitliche Druckschwankung registriert wurde. Im Folgenden werden die Positionen der Mikrofonarrays mit V (vor dem Testobjekt) und H (hinter dem Testobjekt) bezeichnet.

Um die Störung der Reflexion von den Rändern bei $x = 0 \text{ m}$ und 30 m zu vermeiden, wurde die Laufzeit der Rechnung explizit aus der Breite des Rechengebiets und der Schallgeschwindigkeit gesteuert

$$\text{Laufzeit} = \frac{30 \text{ m}}{340 \text{ m/s}} = 0.088235 \text{ s.} \quad (3.1)$$

Abb. 3.3 zeigt drei Möglichkeiten der Wellenausbreitung parallel zur x -Achse während dieser Zeit. Die Strecke a stellt einen durchgehenden Ausbreitungsweg dar. Die Strecken b beschreiben den Ausbreitungsweg mit Reflexion am Testobjekt und die Strecken c den Ausbreitungsweg mit Reflexion am Testobjekt sowie am linken Rand des Rechengebiets. Innerhalb der begrenzten Laufzeit kann die Schallwelle in y -Richtung maximal drei Testobjekte überqueren. Mit dieser Konfiguration ermittelt man flächendeckend am Array V

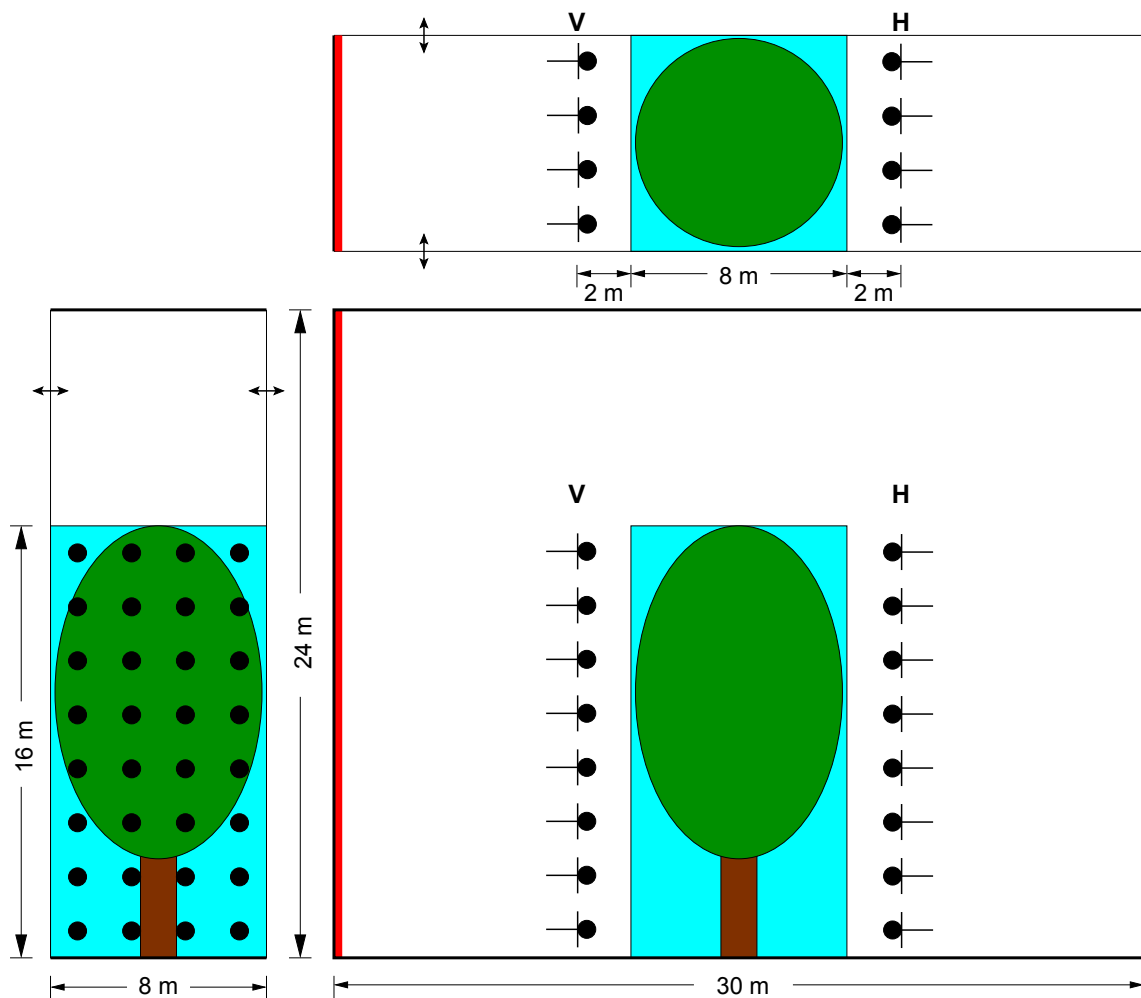


Abb. 3.2.: Skizze des Rechengebiets über die Schallausbreitung an einzelnen Bäumen. Oben — Draufsicht; unten links — Frontansicht; unten rechts — Seitenansicht. Die roten Linien bezeichnen den Gaußschen Puls auf der y - z -Ebene zu Beginn der Rechnung und die schwarzen Punkte die Mikrofone.

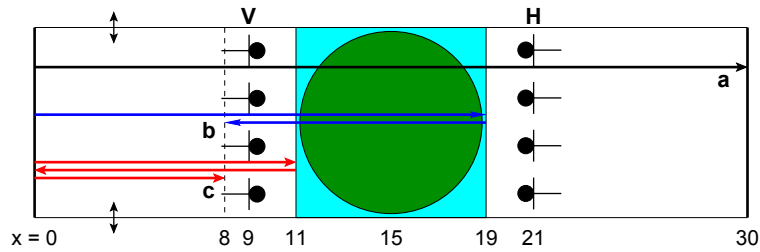


Abb. 3.3.: Skizze möglicher Verläufe der Wellenausbreitung an einzelnen Bäumen innerhalb einer begrenzten Laufzeit, dargestellt in Draufsicht des Rechengebiets. Strecke a — durchgehender Ausbreitungsweg; Strecken b — Ausbreitungsweg mit Reflexion am Testobjekt; Strecken c — Ausbreitungsweg mit Reflexion am Testobjekt sowie am linken Rand des Rechengebiets.

den vom Testobjekt reflektierten Anteil der Schallwelle und am Array H den durchgehenden Anteil.

Um den auflösbaren Frequenzbereich in der Rechnung zu überprüfen, wurde eine Referenzrechnung ohne Hindernis durchgeführt. Es wird erwartet, dass sich die Druckverläufe an den Mikrofonarrays V und H sehr ähnlich verhalten. Wie Abb. 3.4 zeigt, ergibt die Spektralanalyse der aufgenommenen Druckwelle an V und H sehr ähnliche Pegelverläufe bis 1500 Hz. Unter dieser Frequenz beträgt die Differenz der Pegelverläufe weniger als 0.01 dB. Deshalb wird für die folgenden Rechnungen nur der Frequenzbereich $f = (20 \text{ bis } 1500) \text{ Hz}$ berücksichtigt.

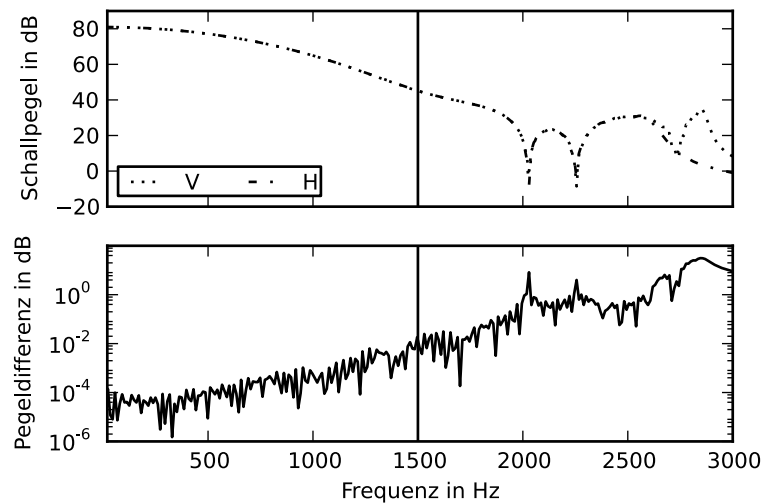


Abb. 3.4.: Vergleich der aufgenommenen Schalldrücke an den Mikrofonarrays V und H in einer Referenzrechnung ohne Hindernis. Oben — die Pegelverläufe an V und H im Spektrum; unten — die Differenz der Pegelverläufe.

3.1.1. Simulation mit realen, lasergescannten Bäumen

In diesem Abschnitt wird die Schallausbreitung an einzelnen Bäumen untersucht. Verschiedene Baumstrukturen, welche mit Laserscanning-Messungen ermittelt wurden, wur-

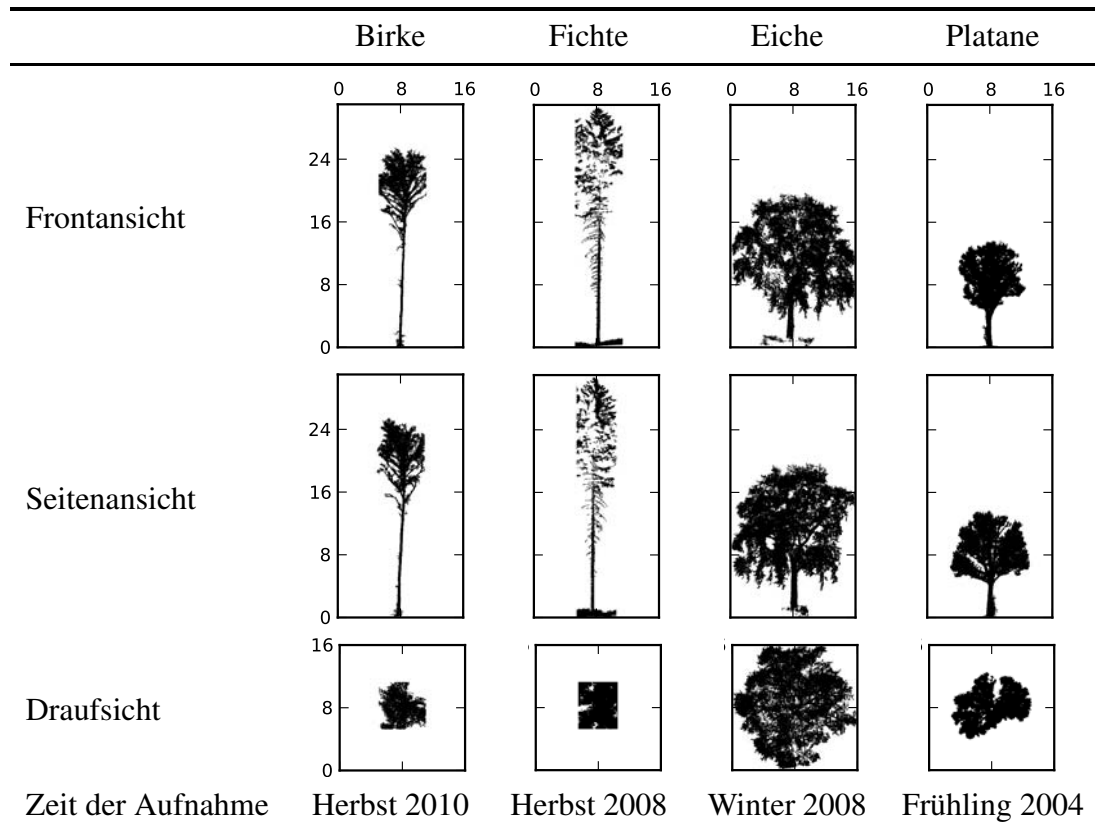


Abb. 3.5.: Übersicht der Bäume aus Voxeldaten der Laserscanning-Messungen, Maßeinheit in Meter

den vom Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden zur Verfügung gestellt (Queck et al., 2011). Die Datensätze einer Birke, Fichte, Eiche und Platane liegen im Voxelformat vor. Die räumliche Auflösung beträgt 5 cm. Eine Übersicht der einzelnen Bäume wird in Abb. 3.5 gegeben.

Die Voxeldaten wurden in das akustische Rechengitter übertragen, wobei erkennbare Bodenbewuchs noch vorab entfernt wurden. Der Vergleichbarkeit halber wurden die Bäume in die vorgesehene Ausdehnung des Testobjekts im Rechenggebiet (Breite 8 m, Länge 8 m, Höhe 16 m) skaliert. Die Oberfläche der Bäume wurde als totalreflektierende angenommen. Vereinzelt vorliegende Lücken wurden aufgefüllt, um numerische Artefakte zu vermeiden. Aufgrund der hohen Dichte von üblichen Fichtenwäldern wurde zusätzlich ein Datensatz, bestehend aus mehreren Fichten, verwendet. Die so überarbeiteten Baumstrukturen werden in Abb. 3.6 gezeigt.

3.1.2. Simulation mit baumähnlichen Strukturen

Um die Parameter zur Verallgemeinerung der Bäume herauszufinden, wurde versucht die Baumstrukturen nachzubilden. Die Konstruktion ging von einem gegebenen Stamm mit dem Durchmesser $d_s = 0.5$ m aus. Durch Variation der Anzahl der Verzweigungsstufe (VS) und der Anzahl der Verzweigungen je Stufe (VZ) wurde die Gestaltung gesteuert,

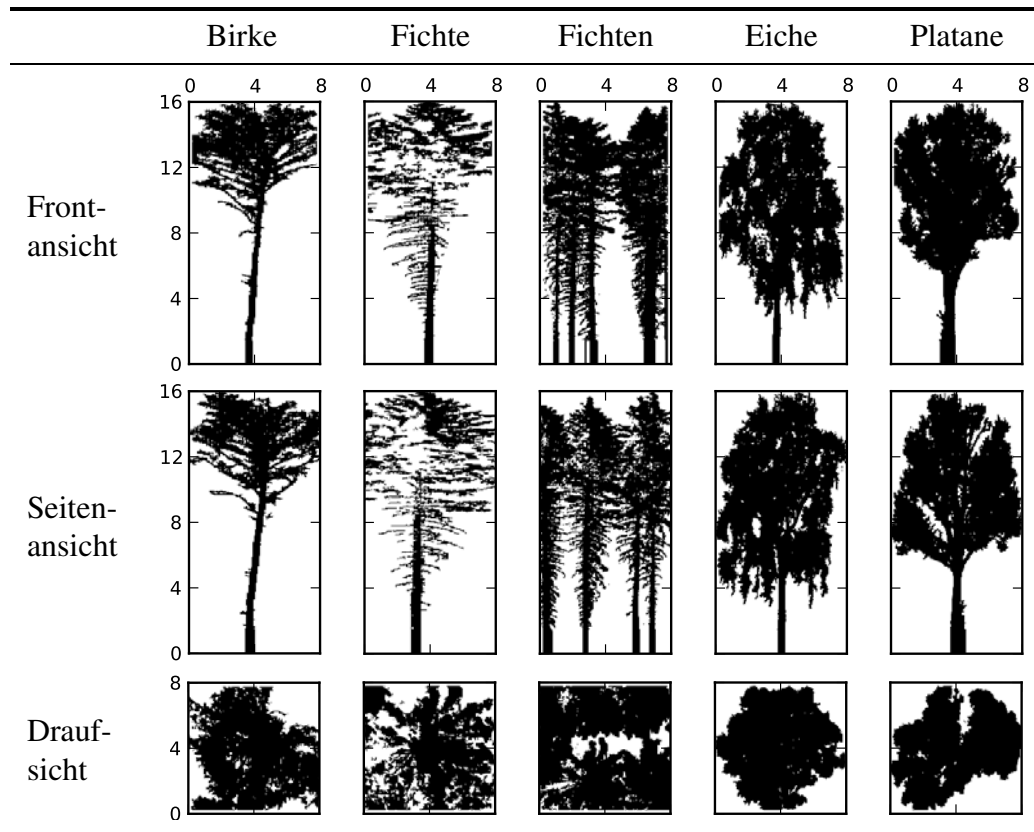


Abb. 3.6.: Struktur der auf das akustische Rechengitter übertragenen Bäume, skaliert auf die Ausdehnung des Testobjekts im Rechenggebiet, Maßeinheit in Meter

	KB1	KB2	KB3	KB4	KB5	KB6
d_S in m	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	0.5
VS	1	3	3	3	3	5
VZ	6	2	4	6	6	6

Beispiel
in Front-
ansicht

Abb. 3.7.: Parameter und Struktur der künstlich erzeugten Bäume KB1 – KB6, Maßeinheit in Meter. d_S bezeichnet den Durchmesser des Stamms, VS die Anzahl der Verzweigungsstufe und VZ die Anzahl der Verzweigungen je Stufe.

siehe Heimann et al. (2012). Zusätzlich wurde ein dickerer Stamm mit dem Durchmesser $d_S = 1$ m erprobt. Insgesamt wurden sechs künstliche Baumstrukturen (KB1, KB2, ..., KB6) gebildet. Zu jeder Baumstruktur wurden fünf Realisationen für die Schallsimulation erzeugt, um die statistische Belastbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen. In Abb. 3.7 werden Beispiele der künstlichen Baumstrukturen dargestellt.

3.1.3. Simulation mit idealisierten Baumstrukturen

Ferner wurde die Gestaltung der Hindernisse in Hinsicht der Akustik stärker idealisiert fortgeführt. Als erstes wurde versucht, mit Hilfe eines Zylinders die Wirkung des Baumstamms nachzubilden. Die Bezeichnung dieser Versuchsreihe lautet ZL. Mit fünf verschiedenen Durchmessern des Zylinders, $d_{ZL} = 0.10$ m, 0.25 m, 0.5 m, 1.0 m und 2.5 m, wurde experimentiert. Die Länge der Zylinder betrug 16 m. Im zweiten Ansatz wurden die Äste eines Baumes mittels verschiedener Würfel, welche im Rechengitter zufällig verteilt wurden, simuliert. Die Gestaltung der Würfel wurde durch verschiedene Volumen und Breiten definiert. Drei Versuchsreihen (WFa, WFb und WFc) wurden durchgeführt, in denen der Volumenanteil der Würfel Φ_V auf jeweils 1 %, 5 % und 10 % gesetzt wurde. Diese Größe entspricht dem Verhältnis des gesamten Würfelvolumens zu dem für das Testobjekt vorgesehenen Volumen. In jeder Versuchsreihe wurde die Breite der Würfel wie folgt variiert, $d_{WF} = 0.15$ m, 0.25 m, 0.35 m, 0.45 m, 0.55 m und 0.65 m, unter denen wieder jeweils fünf unterschiedliche Verteilungen erzeugt und erprobt wurden. Die Ergebnisse wurden gemittelt, um numerische Schwankungen zu vermindern. Einige Beispiele der idealisierten Baumstrukturen werden in Abb. 3.8 gezeigt.

	ZL1 – ZL5	WFa1 – WFa6	WFb1 – WFb6	WFc1 – WFc6
d_{ZL} in m	0.10 – 2.5	-	-	-
d_{WF} in m	-	0.15 – 0.65	0.15 – 0.65	0.15 – 0.65
Φ_V in %	0.01 – 7.7	1.0	5.0	10.0

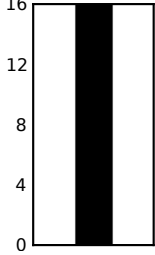



Beispiel in Front- ansicht	0 4 8	0 4 8	0 4 8	0 4 8
				

Abb. 3.8.: Parameter und Struktur der idealisierten Bäume in Form von Zylinder (ZL) und Würfel (WFa, WFb und WFc), Maßeinheit in Meter

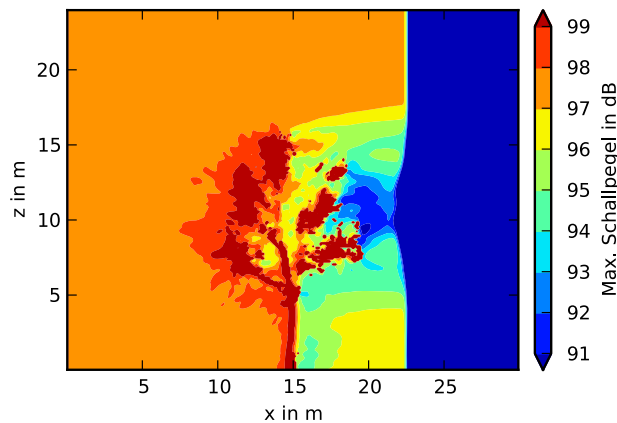


Abb. 3.9.: Momentaufnahme der Wellenausbreitung an der Platane, Längsschnitt bei $y = 4$ m. Angezeigt in Farbskala ist der maximal registrierte Schallpegel in dB. Die Wellenfront befindet sich bei $x = 22.5$ m.

3.2. Rechenergebnisse

Die Rechnungen der Schallausbreitung mit den zuvor gezeigten Testobjekten werden im Folgenden ausgewertet. Man betrachte die fortschreitende Welle aus dem angeregten Puls. Trifft diese auf ein Testobjekt, so wird sie an dessen Oberfläche in verschiedene Richtungen reflektiert. Dies kann man in der Momentaufnahme in Abb. 3.9 gut erkennen. Der auf- und abwärts reflektierte Anteil werden in den Experimenten nicht weiter berücksichtigt, da in Hinsicht des Waldeffekts auf die Schallausbreitung die Reflexion und vor allem die Transmission von Interesse sind. Die Druckschwankungen, welche an den Mikrofonarrays V und H registriert werden, werden einer Spektralanalyse unterzogen. Dadurch ergeben sich die Reflexion und Transmission in Abhängigkeit von der Frequenz, siehe das Beispiel an der Platane in Abb. 3.10 (links). Hierbei werden die Pegelwerte über das entsprechende Array gemittelt. Als Referenz dient das Spektrum der Ausbreitung im

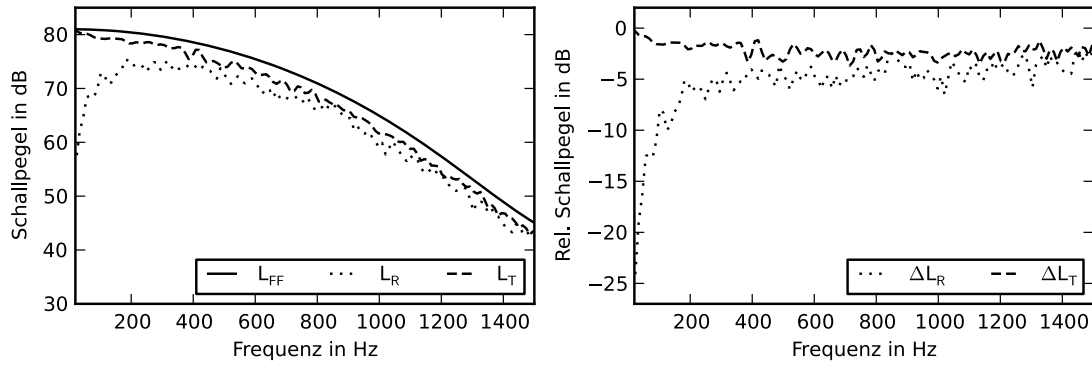


Abb. 3.10.: Spektrum der Reflexion und Transmission an der Platane. Links — Schallpegel der Reflexion (L_R) und der Transmission (L_T) sowie der Referenzrechnung im Freien (L_{FF}); rechts — relativer Schallpegel der Reflexion (ΔL_R) und der Transmission (ΔL_T), bezogen auf die Referenzrechnung im Freien.

Freien. Um die Reflexion und Transmission besser miteinander zu vergleichen, wird deren Differenz im Vergleich zur Referenz wie folgt ausgedrückt

$$\Delta L_R = L_R - L_{FF} \quad (3.2)$$

$$\Delta L_T = L_T - L_{FF} . \quad (3.3)$$

Diese Größen bleiben prinzipiell im Minusbereich, da die Schallenergie durch Streuung, Reflexion und Transmission nicht zunimmt. Je höher der Betrag (mit Berücksichtigung des Vorzeichens) ist, desto stärker ist der Effekt der Reflexion bzw. der Transmission des Testobjekts. In Abb. 3.10 rechts werden ΔL_R und ΔL_T im Spektrum gezeigt. Man kann deutlich sehen, dass die Schallwelle an der Platane stärker transmittiert wird als davon reflektiert. Die Reflexion ist für die tiefen Frequenzen $f \leq 200$ Hz besonders schwach. Bei $f > 400$ Hz liegt die Reflexion schwankend um ca. 5 dB niedriger im Vergleich zu dem Referenzpegel. Daraus kann man schlussfolgern, dass die tiefen Frequenzen eher transmittiert und die hohen Frequenzen eher reflektiert bzw. zurückgestreut werden.

In den Diagrammen wird eine stetige, frequenzabhängige Pegelschwankung beobachtet. Ursache dafür sind die Interferenzen der Druckwelle am vorhandenen Hindernis, welche von der Wellenlänge und der räumlichen Begebenheit abhängig sind. Um dies zu verdeutlichen, wurde diese Rechnung in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen mit $\Delta l_{x,y,z} = 5.25$ cm, 5.50 cm, 5.75 cm und 6.00 cm wiederholt. Die Diskretisierung des Testobjekts mit diesen Auflösungen ergeben andere räumliche Begebenheiten bei dennoch sehr ähnlichen Strukturen, siehe die Skizze in Abb. 3.11.

Die Ergebnisse werden dem der Ausgangsrechnung ($\Delta l_{x,y,z} = 5.00$ cm) in Abb. 3.12 gegenübergestellt, ΔL_R im linken Diagramm und ΔL_T im rechten. Durch die Variation der Auflösung ändern sich sowohl die Position der Scheitelwerte als auch deren Betrag. Über die Frequenzen gemittelt ergibt sich in unterschiedlichen Auflösungen der äquivalente Schallpegel bei ΔL_R um -6.3 ± 0.1 dB und bei ΔL_T um -1.7 ± 0.1 dB. Somit liegt die durch unterschiedliche Auflösung verursachte Pegelschwankung im akzeptablen Bereich.

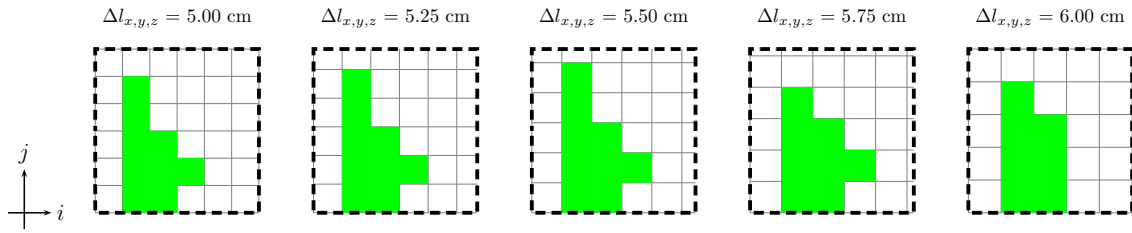


Abb. 3.11.: Skizze über die Diskretisierung mit unterschiedlichen Auflösungen. Die schwarzen Kreise kennzeichnen die vorliegenden Voxeldaten aus den Laserscanning-Messungen, die festen Linien das Rechengitter in unterschiedlichen Auflösungen und die grünen Kästchen die als Baumsubstanz übertragene Fläche. Durch die gestrichelten Linien ist ein Ausschnitt von $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ des betrachteten Rechengitters gegeben.

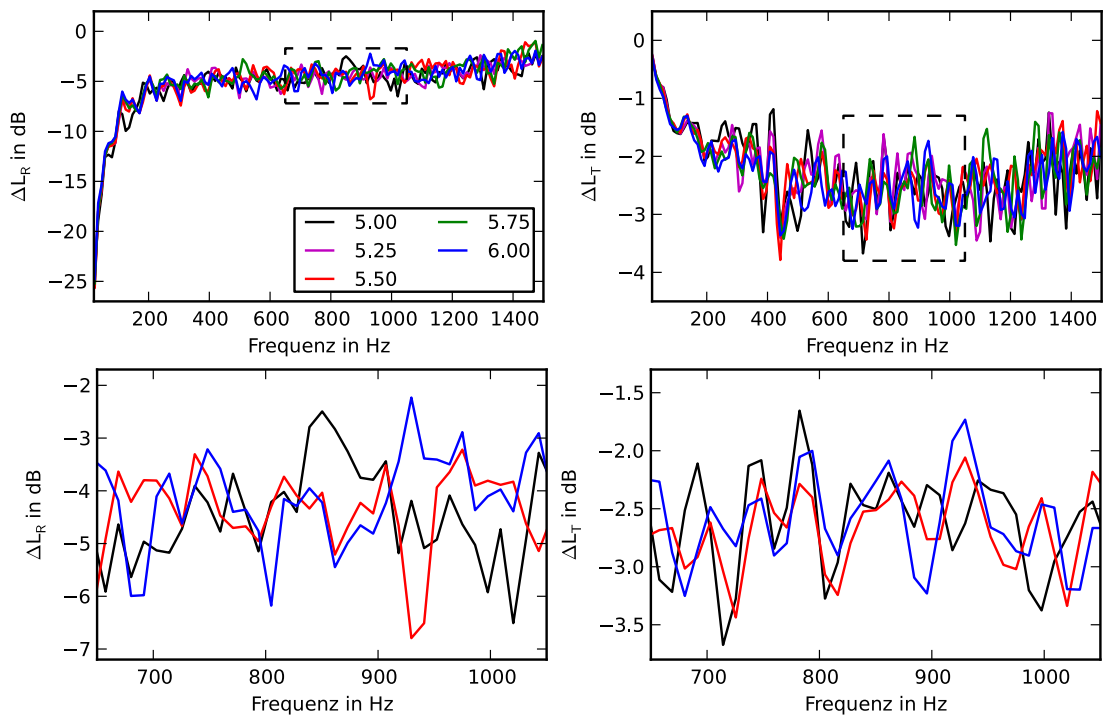


Abb. 3.12.: Spektrum der relativen Reflexion ΔL_R (links) und Transmission ΔL_T (links) an der Platane in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen, bezogen auf den Referenzpegel L_{FF} , Angaben in dB. Oben — Gesamtspektrum in fünf unterschiedlichen Auflösungen $\Delta l_{x,y,z} = 5.00\text{ cm}$, 5.25 cm , 5.50 cm , 5.75 cm und 6.00 cm ; unten — Ausschnitt des gestrichelten Bereichs aus dem obigen Diagramm in drei unterschiedlichen Auflösungen $\Delta l_{x,y,z} = 5.00\text{ cm}$, 5.50 cm und 6.00 cm .

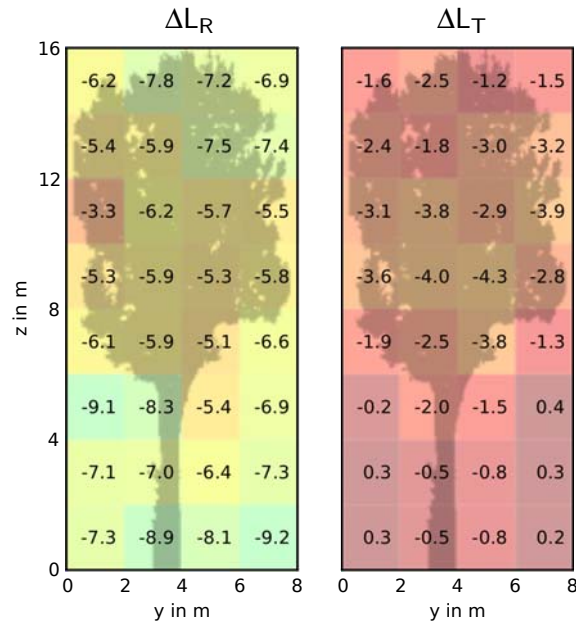


Abb. 3.13.: Räumliche Verteilung der relativen Reflexion ΔL_R (links) und Transmission ΔL_T (rechts) an der Platane, bezogen auf den Referenzpegel L_{FF} , Angaben des Schallpegels in dB, Maßeinheit in Meter. Der Schallpegel wird in Farbskala sowie auch in Ziffer dargestellt.

Ferner können die Reflexion und Transmission in räumlicher Abhängigkeit vom Testobjekt überprüft werden. Abb. 3.13 zeigt ein Beispiel mit der Platane. Die Schattierung bildet die Projektion der Platane auf der y-z-Ebene ab. Der an einem Einzelmikrofon registrierte Pegelwert repräsentiert den mittleren Pegelwert der umliegenden Fläche. Insgesamt ergibt sich an der Baumkrone eine höhere Reflexion. Im Gegensatz dazu nimmt die Transmission in diesem Bereich ab. Es besteht jedoch keine einfache, lineare Abhängigkeit zwischen der Reflexion bzw. der Transmission und der lokalen Dichte der Projektion. Zwei Beispiele für unterschiedliche Reflexion bei ähnlicher lokaler Dichte findet man bei $y = 3$ m und $z = 13$ m mit einem Wert von -5.9 dB, im Gegensatz dazu bei $y = 5$ m und $z = 13$ m mit einem Wert von -7.5 dB. Die Beobachtung zeigt, dass im Modell die Reflexion, Streuung und Beugung des Schalls in verschiedenste Richtungen möglich sind.

Gemäß der Abb. 3.13 ist darauf zu schließen, dass die Baumkrone den Schall anders reflektiert bzw. durchlässt als der Baumstamm. Je mehr Hindernisse vorliegen, desto stärker ist die Reflexion bzw. desto schwächer ist die Transmission. Um dies zu veranschaulichen, werden in Abb. 3.14 die vertikale Verteilung der Reflexion ΔL_R und Transmission ΔL_T sowie des Baumvolumens dargestellt. Dabei wird das Baumvolumen durch die Anzahl der vom Holz besetzten Gitter N_{Holz} ausgedrückt. Die Pegelwerte von Reflexion bzw. Transmission werden horizontal gemittelt. Bei Birke, Eiche und Platane gibt es eine ausgeprägte Baumkrone gegenüber dem Baumstamm. Hierbei ist die Reflexion im Kronenbereich stärker als im Stammbereich und umgekehrt im Falle der Transmission. Die maximale Abschwächung der Transmission im Kronenbereich im Vergleich zum Stammbereich (um knapp 4 dB) wird bei der Platane beobachtet. Bei der einzelnen Fichte ist das Baumvolumen im Vergleich zu den anderen Bäumen gering. Dementsprechend ist die Reflexion niedrig und die Transmission hoch. Bei der Fichtengruppe ist die Baumkrone deutlich zu

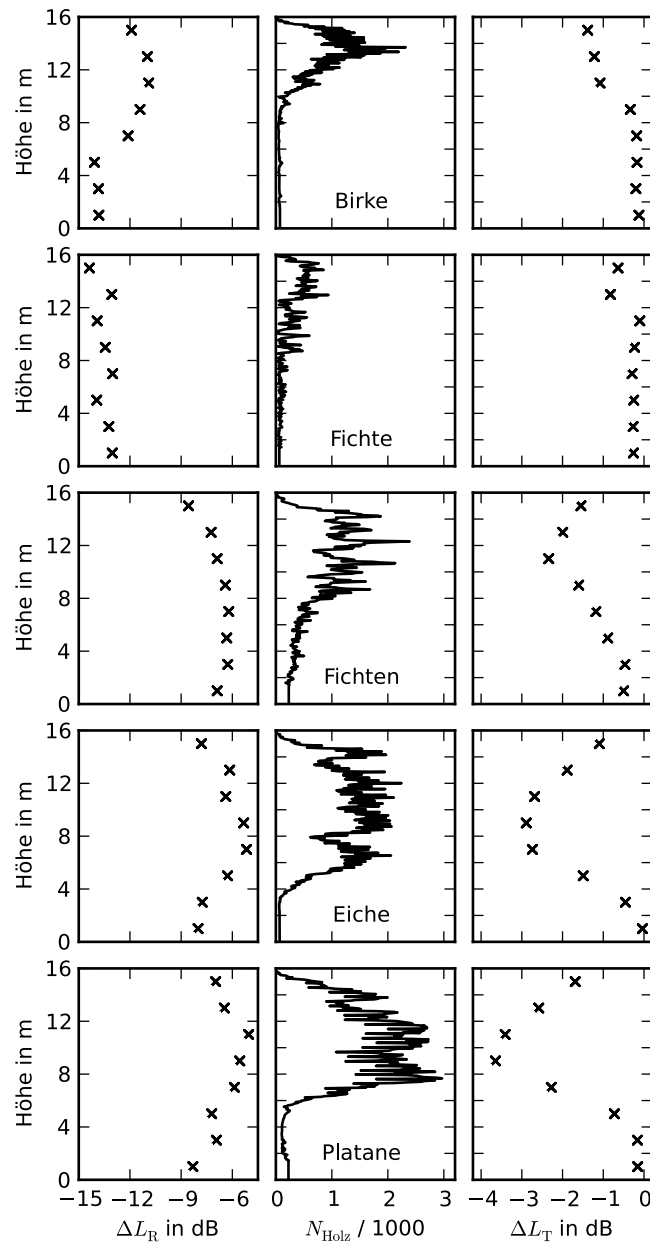


Abb. 3.14.: Vertikale Verteilung der Reflexion ΔL_R und Transmission ΔL_T sowie Baumvolumen, ausgedrückt in Anzahl der vom Holz besetzten Gitter N_{Holz}

sehen. Im Kronenbereich wird die Transmission um bis zu 2 dB stärker abgeschwächt als im Stammbereich.

Mit den zuvor genannten Verfahren werden die Rechenergebnisse ausgewertet. Besonders wichtig für die Überlegung über die akustische Wirkung der Testobjekte ist die Frequenzabhängigkeit der Reflexion und der Transmission. Dies wird in den folgenden Abschnitten diskutiert.

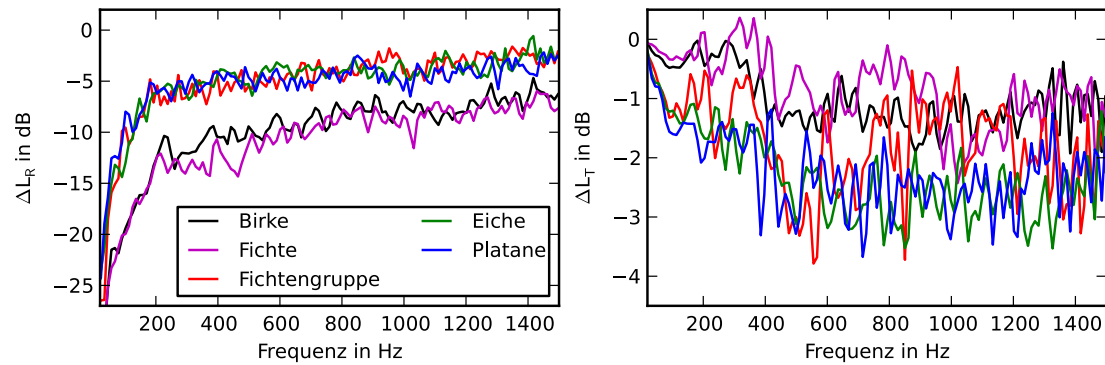


Abb. 3.15.: Spektrum der relativen Reflexion ΔL_R (links) und Transmission ΔL_T (rechts) an den lasergescannten Baumstrukturen, gemittelt über das Mikrofonarray, bezogen auf den Referenzpegel L_{FF} , Angaben in dB

3.2.1. Schalluntersuchung mit realen, lasergescannten Baumstrukturen

Die Schallausbreitung an den fünf Baumstrukturen wurde berechnet. Die räumlich gemittelten Pegelwerte der Reflexion und der Transmission, bezogen auf den Referenzpegel, werden im Spektrum in Abb. 3.15 dargestellt. Im linken Diagramm wird die Reflexion ΔL_R gezeigt, in dem deutlich zwei Gruppierungen zu sehen sind. An der Birke und der einzelnen Fichte wird der Schall schwächer reflektiert als an den anderen drei Baumstrukturen. Die Unterscheidung dieser zwei Gruppierungen ist bei der Transmission, im rechten Diagramm, verhältnismäßig geringer. Im tiefen Frequenzbereich ($f \leq 50$ Hz) wird der Schall nahezu vollständig transmittiert. Mit zunehmender Frequenz sinkt die Transmission. Diese liegt im Frequenzbereich $f > 500$ Hz schwankend um -1 dB an der Birke und der einzelnen Fichte sowie um -2.5 dB an den anderen Baumstrukturen. Der äquivalente Schallpegel der Reflexion ΔL_R und der Transmission ΔL_T , gemittelt über die Frequenzen, wird in Tab. 3.1 zusammengefasst.

Tab. 3.1.: Äquivalenter Schallpegel der relativen Reflexion ΔL_R und Transmission ΔL_T an den lasergescannten Baumstrukturen, gemittelt über das Mikrofonarray und die Frequenzen, bezogen auf den Referenzpegel L_{FF} , Angaben in dB

	ΔL_R	ΔL_T
Birke	-12.2	-0.6
Fichte	-13.5	-0.4
Fichtengruppe	-6.8	-1.3
Eiche	-6.5	-1.5
Platane	-6.4	-1.6

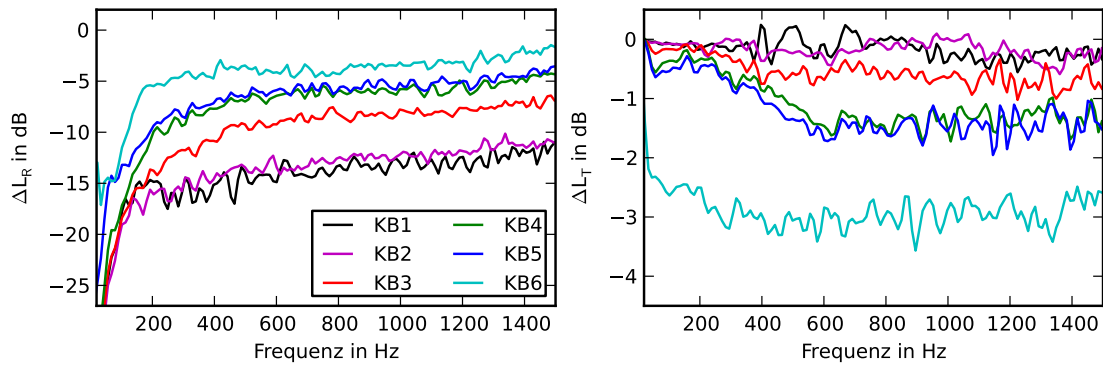


Abb. 3.16.: Spektrum der relativen Reflexion ΔL_R (links) und Transmission ΔL_T (rechts) an den baumähnlichen Strukturen, gemittelt über das Mikrofonarray, bezogen auf den Referenzpegel L_{FF} , Angaben in dB

3.2.2. Schalluntersuchung mit baumähnlichen Strukturen

In Abb. 3.16 werden die berechnete Reflexion und Transmission an den vorgestellten baumähnlichen Strukturen gezeigt. Eine deutliche Tendenz wird von KB1 bis KB6 beobachtet. In dieser Reihenfolge nimmt die Reflexion ΔL_R zu und die Transmission ΔL_T ab. Offensichtlich liegt eine Abhängigkeit zwischen der Reflexion bzw. der Transmission und dem Volumen bzw. der projizierten Frontfläche des Testobjekts vor. Dies wird in Abschnitt 3.3 weiter diskutiert. Die Pegelverläufe, insbesondere die von KB3 bis KB6, sind denen der lasergescannten Baumstrukturen (Abb. 3.15) sehr ähnlich. Der äquivalente Schallpegel der Reflexion ΔL_R und der Transmission ΔL_T im Vergleich zum Referenzpegel wird in Tab. 3.2 dargestellt. KB3 zeigt einen ähnlichen Pegelwert der Reflexion bzw. der Transmission wie die Birke und die einzelne Fichte. Baumstrukturen mit einem hohen Volumen werden durch KB6 am besten nachgebildet. Die Transmission bei diesen Bäumen liegt jedoch um 1 dB höher als bei KB6. Durch die Verdoppelung des Stammdurchmessers (KB4 und KB5) wird die Transmission nur geringfügig vermindert.

Tab. 3.2.: Äquivalenter Schallpegel der relativen Reflexion ΔL_R und Transmission ΔL_T an den baumähnlichen Strukturen, gemittelt über das Mikrofonarray und die Frequenzen, bezogen auf den Referenzpegel L_{FF} , Angaben in dB

	ΔL_R	ΔL_T
KB1	-16.1	-0.1
KB2	-15.8	-0.1
KB3	-12.3	-0.3
KB4	-9.5	-0.6
KB5	-8.7	-0.7
KB6	-5.8	-2.6

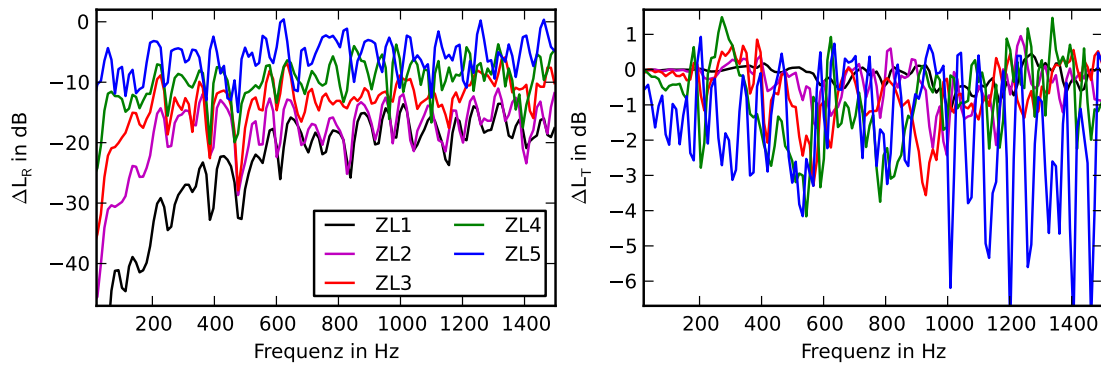


Abb. 3.17.: Spektrum der relativen Reflexion ΔL_R (links) und Transmission ΔL_T (rechts) an den zylindrischen Strukturen in verschiedenen Durchmessern, bezogen auf den Referenzpegel L_{FF} , Angaben in dB

3.2.3. Schalluntersuchung mit idealisierten Baumstrukturen

Die berechnete Reflexion und Transmission an den einzelnen Zylindern ist in Abb. 3.17 dargestellt. Mit zunehmendem Durchmesser nimmt die Reflexion ΔL_R zu. Die in Abschnitt 3.2 besprochene, frequenzabhängige Pegelschwankung ist hier gut ersichtlich. Bei der Transmission ΔL_T ergeben sich positive Pegelwerte in bestimmten Frequenzen. Das heißt, hinter dem Zylinder findet eine Überlappung der Schallwelle statt und dort sind diese Frequenzen stärker zu hören als ohne den Zylinder. Die lokale Verstärkung und Abschwächung der Transmission sind bei den dickeren Zylindern besonders deutlich.

Im Experiment mit den zufällig verteilten Würfeln ist die frequenzabhängige Pegelschwankung schwächer ausgeprägt, siehe Abb. 3.18. Die Diagramme in der linken bzw. rechten Spalte zeigen eine Abhängigkeit der Reflexion ΔL_R bzw. der Transmission ΔL_T von der Würfelbreite d_{WF} . Ausgehend von einem gegebenen Gesamtvolumen besitzen die kleineren Würfel eine höhere Gesamtoberfläche und auch eine höhere Gesamtfrontfläche in Hinsicht der einfallenden Schallwelle. Damit werden die hohen Frequenzen stärker reflektiert bzw. schwächer transmittiert und bei den tiefen Frequenzen umgekehrt. Mit zunehmendem Volumenanteil der Würfel, siehe Diagramme von oben nach unten, nimmt die Reflexion deutlich zu und die Transmission ab. Die maximale Abschwächung der Transmission ergibt sich bei WFc1 im Frequenzbereich $f = (1000 \text{ bis } 1200) \text{ Hz}$.

In Tab. 3.3 wird der äquivalente Schallpegel der Reflexion ΔL_R und der Transmission ΔL_T an den Zylindern und Würfeln gezeigt. Im Fall des Zylinders wird mit zunehmendem Durchmesser die Reflexion stärker und die Transmission schwächer. Bei den Würfeln kann durch variierte Würfelgröße keine eindeutige Tendenz der Veränderung an Reflexion und Transmission beobachtet werden. Die Rechenergebnisse mit Fichtengruppe, Eiche und Platane werden durch ZL5 mit $\Delta L_R = -6.2 \text{ dB}$ und $\Delta L_T = -1.2 \text{ dB}$ am besten angenähert, vergleiche dazu Tab. 3.1.

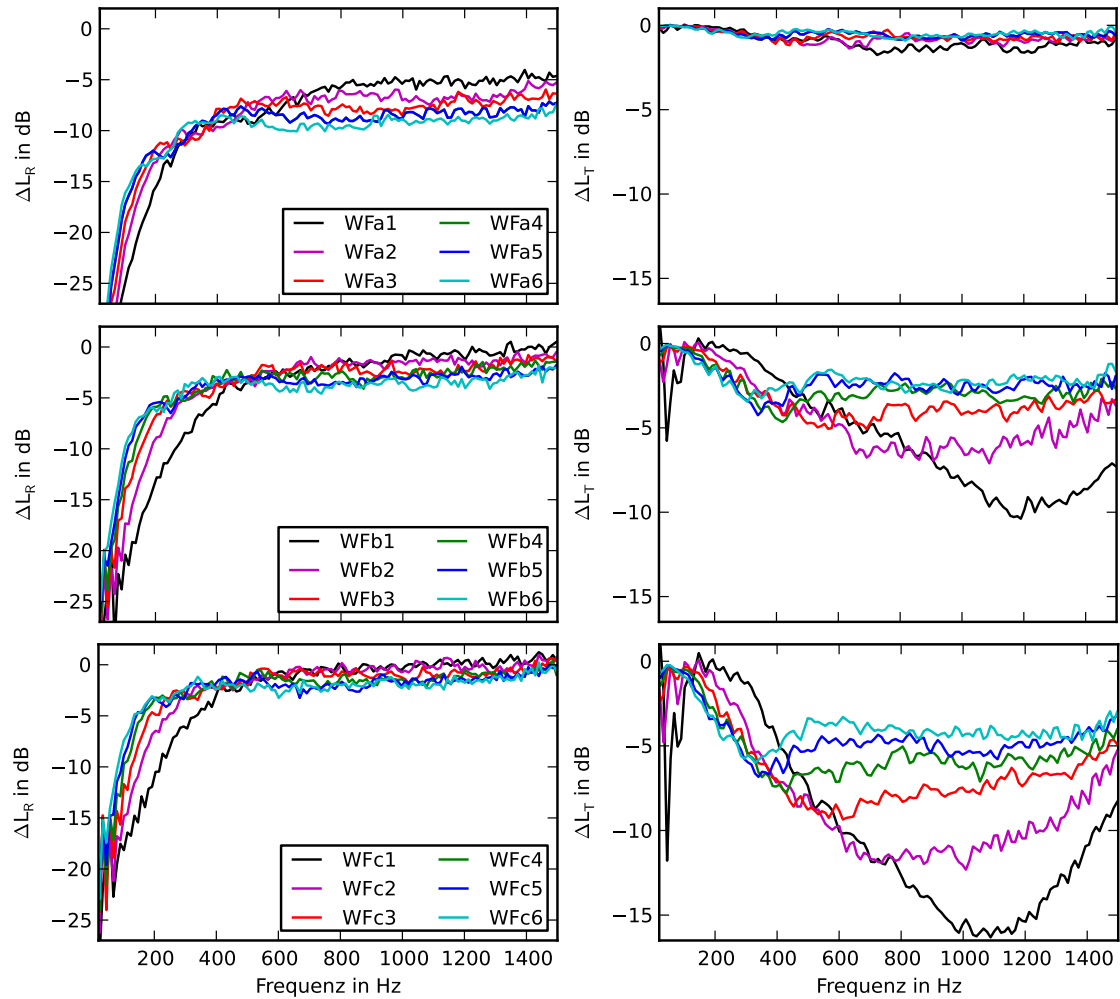


Abb. 3.18.: Spektrum der Reflexion ΔL_R (links) und Transmission ΔL_T (rechts) an den würfelförmigen Strukturen in verschiedenen Größen, bezogen auf den Referenzpegel L_{FF} , Angaben in dB. Der Volumenanteil Φ_V beträgt von oben nach unten jeweils 1 %, 5 % und 10 %.

3.3. Vergleich der Ergebnisse

In den vorangegangenen Abschnitten wurde die Schallausbreitung an Baumstrukturen und anderen idealisierten Hindernissen berechnet. An der Birke und der einzelnen Fichte wurde der Schall kaum reflektiert und fast ungehindert transmittiert; dagegen wurde an den voluminösen Baumstrukturen, d. h. an der Fichtengruppe, Eiche und Platane, eine stärkere Reflexion sowie eine abgeschwächte Transmission festgestellt.

Diese Studie zeichnet durch die detaillierte Betrachtung des Kronenbereichs aus, durch welche der zusätzliche Einfluss der Baumkrone gegenüber dem Baumstamm feststellbar wird. Hierzu vergleicht man die Baumstrukturen bzw. die baumähnlichen Strukturen mit den Zylindrischen. Im Beispiel mit KB4 und ZL3, bei denen ein identischer Stammdurchmesser von 0.5 m misst, zeigt KB4 eine Dämpfung von 0.6 dB und ZL3 lediglich 0.3 dB. Dieser Unterschied der Dämpfung ist offenkundig der Baumkrone von KB4 zuzuschreiben. Im Falle der Eiche, mit einem Stammdurchmesser von ca. 0.23 m, wird sogar eine Dämpfung von 1.5 dB festgestellt. Diese ist eindeutig höher als die von ZL2 (Stammdurchmesser 0.25 m). Die Untersuchung zeigt zum ersten Mal in diesem Forschungsgebiet, dass der Kronenbereich eines Waldes eine nicht vernachlässigbare Dämpfung gegenüber dem Stammbereich aufweist.

Um die Baumstruktur bzw. im Allgemeinen die Vegetation auf eine einfache Weise zu charakterisieren, wird oft im Bereich der Meteorologie und Ökologie der Blattflächenindex, abgekürzt in BFI, (engl. leaf area index) benutzt. Dieser gibt das Verhältnis der gesamten Blattfläche zu der projizierten Grundfläche der Pflanze an. In der Literatur wird jedoch die Blattfläche unterschiedlich definiert, siehe z. B. Scurlock et al. (2001). Zu-

Tab. 3.3.: Äquivalenter Schallpegel der relativen Reflexion ΔL_R und Transmission ΔL_T an den idealisierten Baumstrukturen, gemittelt über das Mikrofonarray und die Frequenzen, bezogen auf den Referenzpegel L_{FF} , Angaben in dB.

			ΔL_R ΔL_T				
			ZL1	–25.4 –0.0			
			ZL2	–18.1 –0.1			
			ZL3	–14.1 –0.3			
			ZL4	–10.8 –0.6			
			ZL5	–6.2 –1.2			
	ΔL_R	ΔL_T		ΔL_R ΔL_T		ΔL_R	ΔL_T
WFa1	–12.4	–0.3	Wfb1	–7.2 –1.4	Wfc1	–5.4	–2.5
WFa2	–11.3	–0.4	Wfb2	–6.0 –1.7	Wfc2	–4.4	–2.9
WFa3	–10.9	–0.4	Wfb3	–5.6 –1.8	Wfc3	–4.0	–3.1
WFa4	–10.8	–0.4	Wfb4	–5.6 –1.8	Wfc4	–3.8	–3.1
WFa5	–11.1	–0.4	Wfb5	–5.6 –1.7	Wfc5	–3.8	–3.0
WFa6	–11.5	–0.3	Wfb6	–5.6 –1.6	Wfc6	–3.8	–2.8

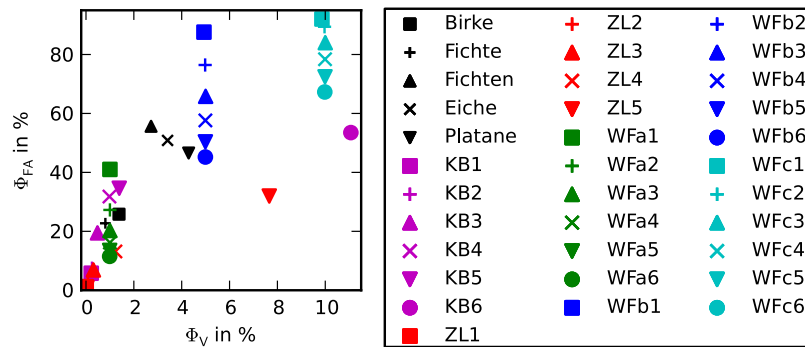


Abb. 3.19.: Verhältnis des Volumenanteils Φ_V zum Frontflächenanteil Φ_{FA} der untersuchten Testobjekte

dem variieren die Angaben nach der Untergattung der Pflanzen, der Jahreszeit und der Bestimmungsmethode im breiten Bereich, siehe Tab. 3.4. Im Gegensatz dazu bieten sich anhand der vorliegenden Datensätze der Laserscanning-Messungen Parameter an, welche einfacher zu bestimmen sind und möglicherweise auch Rückschlüsse auf die akustische Wirkung zulassen. Hierbei wird der Volumenanteil Φ_V als Verhältnis des Volumens des Testobjekts zum umhüllenden Volumen definiert; der Frontflächenanteil Φ_{FA} wird als Verhältnis der projizierten Fläche auf der y-z-Ebene zur umhüllenden Fläche definiert. Diese Parameter werden ebenfalls für die untersuchten Baumstrukturen in Tab. 3.4 gezeigt. Zwischen dem Blattflächenindex und dem Volumen- bzw. Frontflächenanteil muss es für jede einzelne Baumart eine spezifische Funktion geben, da die typische Fläche eines einzigen Blattes bekannt ist und die Anzahl der Blätter von der Anzahl der Äste abhängt, welche wiederum proportional zum gesamten Baumvolumen ist. An dieser Stelle wird nicht auf die Ermittlung dieser Zusammenhänge eingegangen, da die notwendigen Daten nicht vorliegen. Im Folgenden werden aber der Volumen- bzw. Frontflächenanteil als Vergleichsgrößen benutzt.

Die idealisierten Strukturen werden den Baumstrukturen in Hinsicht des Volumen- und Frontflächenanteils in Abb. 3.19 gegenübergestellt. Die Birke und die einzelne Fichte werden in dieser Betrachtung durch KB3, KB4, WFa2 und WFa3 gut nachgebildet. Für die Fichtengruppe, Eiche und Platane liegt keine geeignete idealisierte Baumstruktur vor.

Für die Schalluntersuchung wurden die Reflexion und Transmission an einem Testob-

Tab. 3.4.: Parameter zur Charakterisierung der Bäume. Angaben des Blattflächenindex, BFI, stammen aus Breuer et al. (2003). Über Platane liegt keine Angabe vor. Der Volumenanteil Φ_V und Frontflächenanteil Φ_{FA} errechnen sich aus den Datensätzen der Laserscanning-Messungen.

	BFI in m^2/m^2	Φ_V in %	Φ_{FA} in %
Birke	5.3	1.4	25.8
Fichte	4.1 – 14.0	0.8	22.7
Fichten		2.7	55.6
Eiche	2.5 – 10.0	3.4	50.8
Platane	-	4.3	46.6

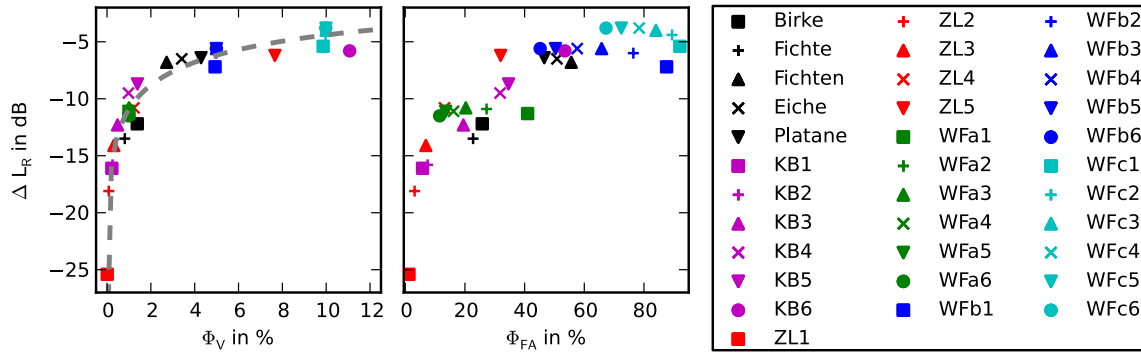


Abb. 3.20.: Schallpegel der relativen Reflexion ΔL_R in Abhängigkeit vom Volumen- Φ_V bzw. Frontflächenanteil Φ_{FA} der untersuchten Testobjekte, bezogen auf den Referenzpegel L_{FF} , Angaben in dB. Die gestrichelte Kurve kennzeichnet die Regressionskurve.

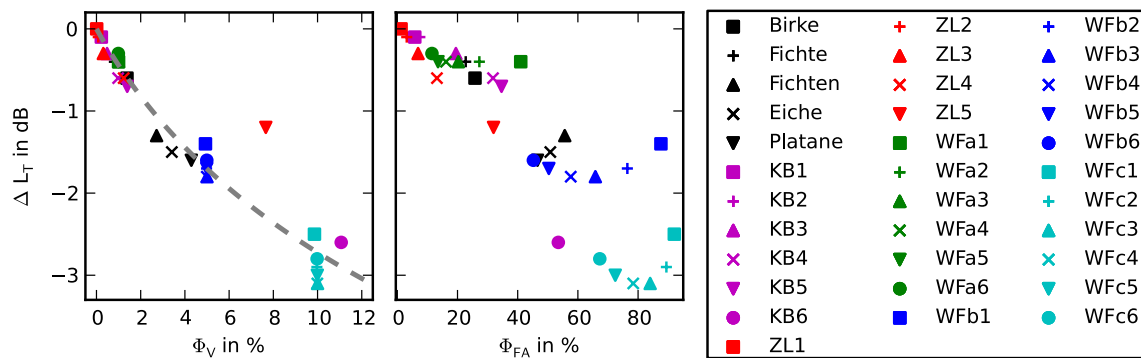


Abb. 3.21.: Schallpegel der relativen Transmission ΔL_T in Abhängigkeit vom Volumen- bzw. Frontflächenanteil der untersuchten Testobjekte, bezogen auf den Referenzpegel L_{FF} , Angaben in dB. Die gestrichelte Kurve kennzeichnet die Regressionskurve.

jekt als Beurteilungskriterium verwendet. Die Reflexion an den Testobjekten in Abhängigkeit von deren Volumen- bzw. Frontflächenanteil wird in Abb. 3.20 gezeigt. Im linken Diagramm kann man eine klare Abhängigkeit der relativen Reflexion ΔL_R vom Volumenanteil des Testobjekts Φ_V sehen, welche durch eine Regressionsfunktion wie folgt formuliert werden kann

$$\Delta L_R = -7.31 \lg\left(1 + \frac{30.0}{\Phi_V}\right), \quad (3.4)$$

siehe die gestrichelte Kurve im Diagramm. Hierbei wurde die Methode der kleinsten Fehlerquadrate verwendet. Der quadratische Mittelwert der Fehler ε_R bezüglich der Rechenergebnisse beträgt 0.9 dB. Im Bereich geringen Volumenanteils $\Phi_V < 0.5 \%$ wird die Abweichung zwischen dieser Kurve und den Rechenergebnissen größer. Diese spielt jedoch in der Praxis keine große Rolle, da der Betrag von $\Delta L_R < -15$ dB sehr niedrig ist. Hingegen ist die Abhängigkeit der Reflexion ΔL_R vom Frontflächenanteil, im mittleren Diagramm, nicht eindeutig.

Analog wird nach einer Abhängigkeit der relativen Transmission ΔL_T vom Volumen- bzw. Frontflächenanteil gesucht, siehe Abb. 3.21. Hierbei werden ebenfalls mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate eine Funktion der Transmission vom Volu-

menanteil festgestellt

$$\Delta L_T = -5.94 \lg(1 + 0.19 \cdot \Phi_V). \quad (3.5)$$

Diese Funktion wird im Diagramm durch eine gestrichelte Kurve gekennzeichnet. Damit können mit geringen Abweichungen alle Rechenergebnisse miteinbezogen werden, mit der Ausnahme von ZL5. Der quadratische Mittelwert der Fehler bezüglich der Rechenergebnisse beträgt $\varepsilon_T = 0.2$ dB. Die Baumstrukturen und baumähnlichen Strukturen werden besonders gut durch die Regressionskurve beschrieben. Bei den idealisierten Baumstrukturen werden teilweise Abweichungen beobachtet. Vermutlich liegt die Gültigkeit der Regressionskurve begrenzt in dem Bereich, in dem eine gewisse Ähnlichkeit des Hindernisses zum Baum vorliegt.

3.4. Fehlerbetrachtung

In der zuvor durchgeführten Simulation wurden bestimmte Annahmen getroffen. Die dadurch verursachten Fehler werden im Folgenden identifiziert und abgeschätzt.

Bedingt durch die Maschenweite des Rechengitters von $\Delta l_{x,y,z} = 0.05$ m können die frequenzabhängigen Informationen nur bis zu einer bestimmten Frequenz bestimmt werden. Durch eine Referenzrechnung im Freien (siehe Abb. 3.4) wurde die Obergrenze der auflösbaren Frequenzen festgestellt. Im Bereich von $f < 1500$ Hz betragen die Fehler weniger als 0.01 dB.

Die durch die Diskretisierung verursachte Verzerrung der Testobjekte wurde bereits anhand Abb. 3.11 und 3.12 diskutiert. Diese führt zu einem Fehler von ca. ± 0.1 dB.

Um die Reflexion an den Rändern zu vermeiden, wurde die Ausbreitung bis zur bestimmten Laufzeit gerechnet. Dadurch wurde die abgestrahlte Energie nur zum Teil durch die Mikrofonarrays erfasst. Ein Teil der Schallwelle, welcher mehrfach im Kronenbereich reflektiert oder in y -Richtung quer über das Rechengebiet gestreut wird, hat zu Ende der Rechnung die Mikrofonarrays nicht erreicht. Die Näherungsgleichungen (3.4) und (3.5) sind mit diesem Fehler behaftet, sodass die Summe der reflektierten Energie E_R und der transmittierten Energie E_T nicht der gesamten emittierten Energie E_E entspricht. Somit bleibt ein Teil der Energie unerfasst, E_U . Anhand der Gln. (3.2) und (3.3) errechnet sich die Summe der reflektierten und transmittierten Energie wie folgt

$$\frac{E_R + E_T}{E_E} = 10^{\frac{\Delta L_R}{10}} + 10^{\frac{\Delta L_T}{10}}. \quad (3.6)$$

Werden ΔL_R und ΔL_T aus den Näherungsgleichungen (3.4) und (3.5) eingesetzt, so erhält man den Gesamtanteil der erfassten Energie, siehe Abb. 3.22. Insbesondere bei den laserscannenden Baumstrukturen, mit $\Phi_V = (1 \text{ bis } 5) \%$, wird die Schallausbreitung durch Gln. (3.4) und (3.5) gut beschrieben. Betrachtet man den Bereich von $\Phi_V = (0 \text{ bis } 12) \%$, liegt der Mittelwert des erfassten Energieanteils bei 92 %. Der unerfasste Energieanteil E_U/E_E liegt bei 8 % und entspricht einem Pegel von -11 dB im Vergleich zur Ausbreitung im Freien.

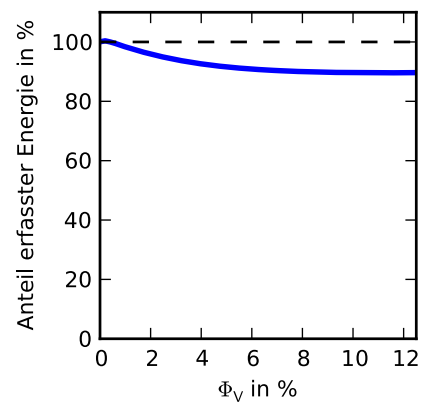


Abb. 3.22.: Erfasste Energie (blau) anhand der Regressionsfunktionen, der Gln. (3.4) und (3.5), in Abhängigkeit vom Volumenanteil Φ_V .

4. Einfluss von idealisierten Waldstreifen auf die Schallausbreitung

Im vorangegangenen Kapitel wurde die Schallausbreitung an einzelnen Bäumen in hoher Auflösung mittels eines FDTD-Modells berechnet. Der Zusammenhang zwischen Schallreflektivität bzw. -transmissivität und Baum- bzw. Astdichte wurden für den Frequenzbereich von 20 Hz bis 1.5 kHz festgestellt. Es stellt sich die Frage, ob und wie die gewonnenen Parameter auf einen ganzen Wald übertragbar sind?

Für ein ganzes Waldgebiet ist das vorgenannte FDTD-Modell ungeeignet, da dieses einen sehr hohen Rechenaufwand erfordert. Deshalb wird in diesem Kapitel ein Schallpartikelmodell entwickelt, welches die Schallausbreitung im horizontalen Waldgebiet effizient simuliert. Ebenfalls basiert auf dem Schema von Schallpartikel war das Modell von Huisman und Attenborough (1991) bekannt, in welchem die Ausbreitung der Schallpartikel stochastisch erfolgt. Im Gegensatz dazu rechnet das Modell dieser Arbeit deterministisch, abhängig von den unterschiedlich erzeugten Waldstreifen. Hinsichtlich der Waldgestaltung wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss auf die akustische Dämpfung zu untersuchen. Daraus wird ein Dämpfungsparameter in Abhängigkeit der Flächendichte des Waldes abgeleitet. Dieser weist eine Analogie zu dem auf das Baumvolumen bezogenen Parameter Φ_V in Kapitel 3 auf.

In dem Modell werden die Bäume in zylindrische Stämme vereinfacht, projiziert in Kreisscheiben auf dem Horizontalschnitt. Die aus der Quelle emittierten Schallpartikel breiten sich geradlinig in alle Richtungen aus. Beim Auftreffen der Schallpartikel auf die Stämme erfolgt eine Spiegelreflexion. Die Äste sowie Blätter werden dabei vernachlässigt. Da jegliche Ausbreitung in vertikaler Richtung entfällt, werden im Modell der Bodeneffekt sowie der meteorologische Effekt nicht berücksichtigt, siehe Abb. 4.1. Die Reflexion bzw. Transmission von Schallpartikeln werden jeweils mit und ohne Waldstreifen ermittelt und somit die Dämpfung bestimmt. Da die Schallpartikel keine Information über Frequenzen enthalten, können die Streuung und Beugung nicht berücksichtigt werden. Mit dieser Einschränkung findet das Modell lediglich Anwendung bei hohen Frequenzen, deren Wellenlänge kleiner als der übliche Stammdurchmesser ist (ca. $\lambda < 0.15$ m bzw. $f > 2300$ Hz).

Die Walddämpfung wird in Hinsicht auf Dichte, Radius und Absorption der Stämme sowie Tiefe des Waldstreifens untersucht. In dem folgenden Abschnitt werden das Konzept und die Konfiguration der Simulation näher erläutert. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 4.2 präsentiert. Diese werden zum Schluss in Abschnitt 4.3 mit den Ergebnissen des vorangegangenen Kapitels 3 verglichen und diskutiert.

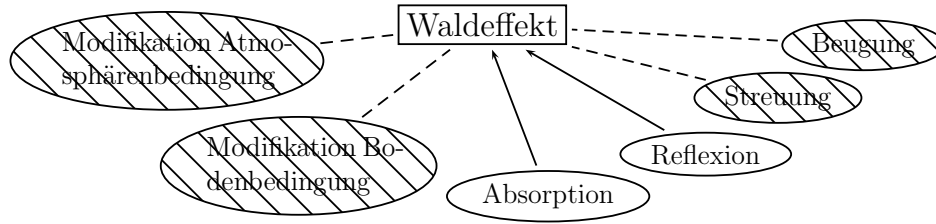


Abb. 4.1.: Skizze über Dämpfungsprozesse der berücksichtigten Waldeffekte. Die nicht miteinbezogenen Effekte sind schraffiert dargestellt.

4.1. Konzept und Konfiguration

In den Studien von z. B. Embleton (1966), Price et al. (1988) und Wunderli (2009, 2012) werden Bäume durch Zylinder idealisiert, wobei die Streutheorie von Twersky (1952, 1964) Anwendung findet. Demnach kann das Schallfeld an zufällig verteilten, zylindrischen Stämmen mittels der Stammdichte D_S (in Anzahl der Stämme/ m^2), des Stammdurchmessers d_S , der Schallimpedanz des Stamms Z_S und der Wellenzahl k beschrieben werden.

$$\Delta L_T = f(D_W, Z_S, d_S, k) \quad (4.1)$$

Huisman und Attenborough (1991) stellten ein Schallpartikelmodell vor, welches auf dem stochastischen Prinzip basiert. Die Walddämpfung wird durch die Trefferwahrscheinlichkeit von Schallpartikeln auf Hindernisse formuliert, welche wiederum eine Funktion von der Stammdichte, dem Reflexionsgrad der Stämme β_S und dem frequenzabhängigen effektiven Stammdurchmesser $d_{S,eff}$ ist

$$\Delta L_T = f(D_W, \beta_S, d_{S,eff}) \quad (4.2)$$

In Anlehnung daran wird in diesem Kapitel der Zusammenhang zwischen der Schalldämpfung und den o. g. Waldparametern experimentell untersucht. Ziel der Simulation ist eine Parametrisierung der Einflüsse von einem ganzen Waldstück durch einfache Waldparameter. Die Frequenzabhängigkeit wird aufgrund der Einschränkung des verwendeten Schallpartikelmodells nicht berücksichtigt.

Man betrachte ein Gebiet auf der x - y -Ebene, $x = [0, x_1]$ und $y = [-y_1, y_1]$ mit jeweils $x_1 = 100$ m und $y_1 = 100$ m. In dem Gebiet befindet sich zwischen $x = [x_{W1}, x_{W2}]$ ein Waldstreifen, welcher aus Stämmen mit definiertem Radius und definierter Dichte (angegeben in Anzahl der Stämme/(100 m^2)) besteht, siehe Abb. 4.2. Eine Linienquelle wird entlang der x -Achse durch mehrere Punktquellen im Abstand von 4 m simuliert. Aus jeder dieser Punktquellen werden 8×10^5 Schallpartikel im gleichmäßigen Winkel zwischen π und 2π im Gegenuhrzeigersinn (bezogen auf die y -Achse) abgesendet. Insgesamt ergeben sich im Rechengebiet 2×10^6 Schallpartikel. Die Anzahl der emittierten Partikel wird so gewählt, dass die statistische Genauigkeit in akzeptabler Rechenzeit maximiert wird.

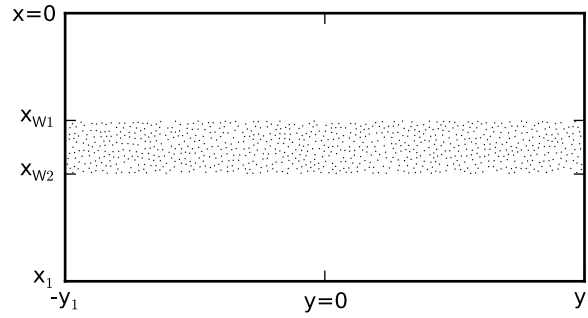


Abb. 4.2.: Rechengebiet des Schallpartikelmodells auf der horizontalen Ebene. Das Waldstück wird durch einen Streifen zufällig verteilter Stämme (in Kreisscheiben repräsentiert) in dem Bereich von $x = [x_{W1}, x_{W2}]$ simuliert. In diesem Beispiel beträgt der Stammradius 0.25 m und die Stammdichte $20/(100 \text{ m}^2)$ (bezogen auf die Fläche des Streifens), d. h. insgesamt 800 Stämme.

Die von der Quelle abgestrahlten Schallpartikel bewegen sich unabhängig voneinander, geradlinig auf der x - y -Ebene vorwärts. Im hindernisfreien Rechengebiet können die Schallpartikel die Ränder $x = x_1$, $y = -y_1$ und $y = y_1$ erreichen. Wenn sich Hindernisse im Rechengebiet befinden, so findet beim Auftreffen von Schallpartikeln auf diese Hindernisse eine Spiegelreflexion statt. In die reflektierte Richtung setzt sich die Ausbreitung fort. Durch den Waldstreifen können die Schallpartikel in alle Richtungen umgelenkt werden.

Entlang der Ränder $x = 0$ und $x = x_1$ werden die reflektierten bzw. transmittierten Schallpartikel mit einer Auflösung von $\Delta y = 10 \text{ m}$ zusammengezählt. Für $y = -y_1$ und $y = y_1$ werden zyklische Randbedingungen verwendet, sodass von einer in y -Richtung unendlich ausgedehnten Waldstreifen ausgegangen wird. Jedoch spielen in der Praxis die Schallpartikel aus einer großen Entfernung keine Rolle für die Immission. Deshalb wird der begangene Schallweg auf 1 km begrenzt, die fünffache Ausdehnung des Rechengebiets in y -Richtung. Schallpartikel, welche bereits diese Entfernung zurücklegten, werden nicht weiter verfolgt und als Verlust im Modell erfasst. Ein weiteres Abbruchkriterium wird durch die Häufigkeit der Reflexion eines Schallpartikels formuliert. Die häufiger als 50-fach reflektierten Schallpartikel werden zum Verlust gezählt. Das Gleichgewicht der Partikelanzahl N im Modell lässt sich wie folgt aufstellen

$$N_E = N_R + N_T + N_V, \quad (4.3)$$

wobei der Index E die Emission bezeichnet, R die Reflexion, T die Transmission und V die Verluste.

Von einer Ausbreitung im Freien erwartet man, dass die emittierten Schallpartikel ungehindert den Rand bei $x = x_1$ erreichen. Dies wird in diesem Modell wiedergegeben und durch ein Histogramm in roten Balken in Abb. 4.3 links angezeigt. Hierin wird wegen einer besseren Übersicht die Balken in einer Breite von 6 m (statt 10 m) dargestellt. Man sieht eine gleichmäßige Verteilung der empfangenen Schallpartikel, welche der implementierten Linienquelle entspricht. Die Summe der empfangenen Partikel beträgt $N_T = 1.87 \times 10^6$. Die Differenz zu den insgesamt emittierten Partikeln $N_E = 2 \times 10^6$ beträgt 6.5 %. Diese entspricht dem Verlust, welcher im vorherigen Absatz beschrieben wurde. Mit Hindernissen im Rechengebiet ergeben sich eine abgeschwächte Transmission

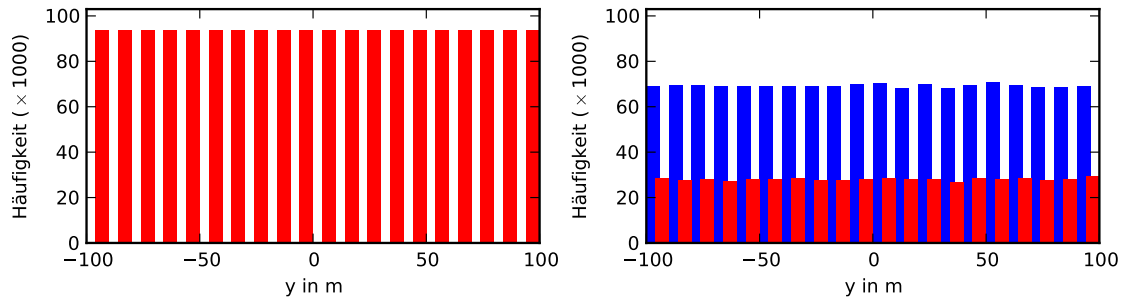


Abb. 4.3.: Häufigkeitsverteilung der transmittierten Schallpartikel, empfangenen bei $x = 100$ m (rot), und der reflektierten Schallpartikel, empfangenen bei $x = 0$ m (blau), mit einem Verteilungsintervall von $\Delta y = 10$ m. Links — Rechnung im Freien; rechts — Rechnung mit Hindernissen.

(gegenüber der Rechnung im Freien) und zusätzlich eine Reflexion, dargestellt in blauen Balken in Abb. 4.3 rechts. Eine Schwankung der Häufigkeitsverteilung in y -Richtung wird beobachtet, welche auf die zufällig verteilten Positionen der Stämme zurückzuführen ist. Die Standardabweichung beträgt sowohl für die Reflexion als auch für die Transmission 0.25. Der Verlust dieser Rechnung liegt bei 3.0 %.

Um Informationen in akustischer Hinsicht aus den Rechnungen zu erhalten, sind die folgenden Überlegungen notwendig. Man nehme an, dass alle Schallpartikel eine einheitliche Energie mit sich tragen. Die empfangene Schallenergie E am Immissionsort ist proportional zu der Anzahl der empfangenen Schallpartikel N . An einer bestimmten Position bei $x = x_1$ seien N_{FF} die empfangenen Partikel in der Rechnung im Freien und N_T die in der Rechnung mit einem Waldstreifen. Somit wird die Erhöhung bzw. Reduzierung der Transmission, die durch das Einfügen eines Waldstreifens verursacht wird, wie folgt in Pegel formuliert

$$\Delta L_T = L_T|_{x=x_1} - L_{FF}|_{x=x_1} = 10 \lg \frac{E_T|_{x=x_1}}{E_{FF}|_{x=x_1}} = 10 \lg \frac{N_T|_{x=x_1}}{N_{FF}|_{x=x_1}}, \quad (4.4)$$

wobei der Index FF die Ausbreitung im Freien bezeichnet und T die Transmission durch den Waldstreifen. Positive Pegelwerte bedeuten eine Pegelerhöhung und negative Pegelwerte eine Pegelreduzierung. Auf eine ähnliche Weise wird die Reflexion ΔL_R bestimmt. Jedoch fehlt der Bezugswert bei $x = 0$, da sich keine Reflexion im Freien ergibt. Aus diesem Grund wird derselbe Bezugswert L_{FF} verwendet

$$\Delta L_R = L_R|_{x=0} - L_{FF}|_{x=x_1} = 10 \lg \frac{N_R|_{x=0}}{N_{FF}|_{x=x_1}}, \quad (4.5)$$

wobei der Index R die Reflexion des Waldstreifens bezeichnet.

4.2. Sensitivitätsanalyse auf Waldparameter

4.2.1. Schalluntersuchung hinsichtlich der Walddichte

Nach den in Kapitel 3 gewonnenen Erkenntnissen ist es naheliegend, dass ein dichter Wald die Schallausbreitung stärker beeinflusst als ein dünner Wald. Die Walddichte lässt sich durch die Stammdichte D_W in Anzahl der Stämme/(100 m²) und den Stammdradius R_S in m formulieren, wobei dieser in den jeweiligen Wäldern als einheitlich angenommen wird. Eine Sensitivitätsanalyse auf diese zwei Parameter wird konzipiert, siehe Tab. 4.1. Durch eine Variation der Stammdichte im Bereich von $D_W = (10 \text{ bis } 30) \text{ Stämme/(100 m}^2\text{)}$ und des Stammdradius im Bereich von $R_S = (0.15 \text{ bis } 0.35) \text{ m}$ werden die Einflüsse dieser Parameter auf die Schallausbreitung untersucht. Die Mittelwerte der variierten Parameter, $D_W = 20 \text{ Stämme/(100 m}^2\text{)}$ bzw. $R_S = 0.25 \text{ m}$, entsprechen den ermittelten Waldparametern im Feldexperiment, welches in Kapitel 5 vorgestellt wird. Damit liegen die zu untersuchenden Parameter im Bereich von normalen Fichtenwäldern.

Zu jeder einzelnen Kombination X_{D_W, R_S} werden nach dem Zufallsprinzip sechs unterschiedliche Waldstreifen (mit dem Laufindex $i = 1 \text{ bis } 6$) erzeugt, welche sich nur durch die unterschiedlichen Positionen der Stämme voneinander unterscheiden. Die Ausbreitung von Schallpartikeln wird in diesen Waldstreifen simuliert und die Häufigkeit der empfangenen Schallpartikel registriert, $(N_R|_{x=0})_i$ und $(N_T|_{x=x_1})_i$ mit $i = 1 \text{ bis } 6$. Daraus wird der arithmetische Mittelwert der Häufigkeit ermittelt

$$\overline{N_R|_{x=0}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (N_R|_{x=0})_i \quad (4.6)$$

$$\overline{N_T|_{x=0}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (N_T|_{x=x_1})_i, \quad (4.7)$$

Weiter werden diese Werte über die 20 Verteilungsintervalle in y-Richtung arithmetisch gemittelt, um einen repräsentativen Wert zu bilden. Dies ist gerechtfertigt, da die Emission einen Linienquelle ist und die Häufigkeitsverteilung über die y-Richtung bei der gewähl-

Tab. 4.1.: Übersicht der Sensitivitätsanalyse auf Stammdichte D_W in Stämme/(100 m²) und Stammdradius R_S in m. X bezeichnet die insgesamt 25 Simulationen und die Indizes D_W und R_S die jeweiligen Variablen. Die sich daraus ergebene bewachsene Waldfläche sind in der Tabelle aufgelistet.

X_{D_W, R_S}		Stammdradius R_S in m				
		0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
Stammdichte D_W in Stämme/(100 m ²)	10	0.71	1.26	1.96	2.83	3.85
	15	1.06	1.88	2.95	4.24	5.77
	20	1.41	2.51	3.93	5.65	7.70
	25	1.77	3.14	4.91	7.07	9.62
	30	2.12	3.77	5.89	8.48	11.55

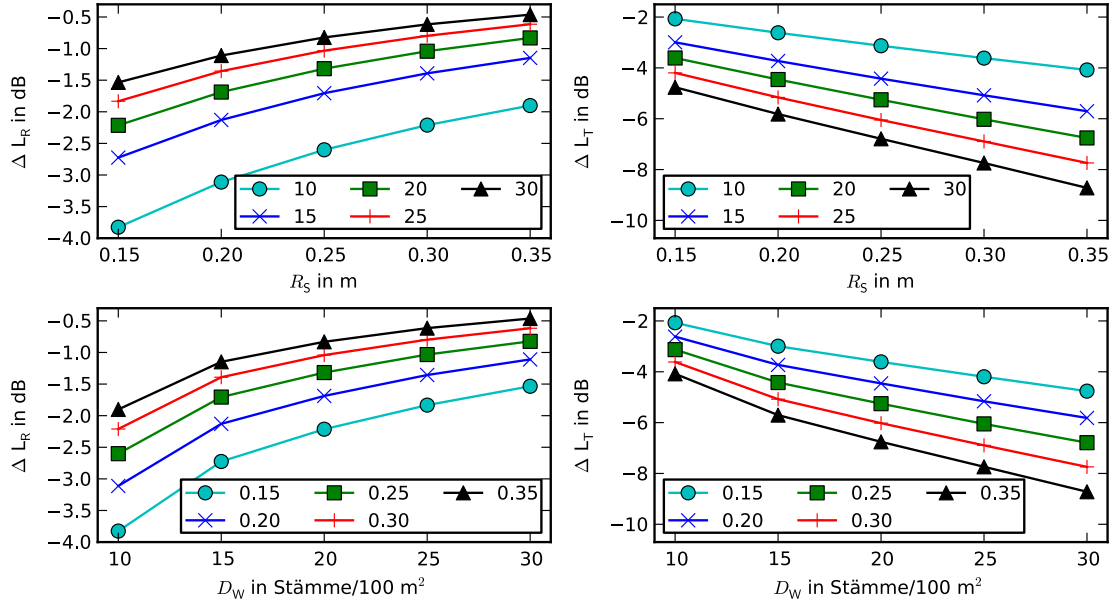


Abb. 4.4.: Schallpegel der relativen Reflexion ΔL_R (links) und Transmission ΔL_T (rechts) gegenüber dem Stammradius R_S (oben) bzw. der Walddichte D_W (unten). In den einzelnen Kurven wird jeweils eine Variable variiert, während die andere konstant gehalten wird, siehe Legende. Der Parameter D_W besitzt die Einheit Stämme/(100 m²) und der Parameter R_S die Einheit m.

ten Anzahl emittierter Schallpartikel eine geringe Varianz aufweist, wie bereits in dem Beispiel in Abb. 4.3 gezeigt wurde.

Nach den Datenaufbereitungen können nun für jede Kombination X_{D_W, d_S} die relativen Pegelwerte der Reflexion bzw. Transmission nach den Gln. (4.4) und (4.5) bestimmt werden. Die Ergebnisse der 25 untersuchten Fälle sind in Abb. 4.4 dargestellt, mit ΔL_R in der linken Spalte und ΔL_T in der rechten. In der oberen Zeile sind die relativen Pegel (bezogen auf $L_{FF}|_{x=x_1}$) gegenüber dem Stammradius R_S geplottet, mit der Stammdichte D_W als Parameter; in der unteren Zeile sind die relativen Pegel gegenüber D_W geplottet, mit R_S als Parameter. Eine eindeutige Abhängigkeit zwischen den relativen Pegeln und den untersuchten Variablen wird beobachtet. Je größer der Stammradius bzw. je höher die Stammdichte, desto höher die Reflexion und desto niedriger die Transmission.

Zum Zweck der Sensitivitätsanalyse wurden D_W und R_S separat betrachtet. Mit diesen zwei Variablen wird die flächenbezogene Walddichte Φ_W wie folgt formuliert

$$\Phi_W = \frac{\pi \cdot R_S^2 \cdot D_W}{S_W}, \quad (4.8)$$

mit S_W der Gesamtfläche des Waldstreifens. Die Walddichte drückt einen Flächenanteil im 2-D Modell aus, das Verhältnis der von Stämmen besetzten Fläche zu der gesamten Fläche im Waldstreifen. Diese ist mit einem Volumenanteil im 3-D Fall zu vergleichen, wenn die Stämme als unendlich lang angenommen werden. Im hindernisfreien Fall ergibt sich $\Phi_W = 0$; wenn der Waldstreifen mit der maximal möglichen Anzahl von Stämmen besetzt wird, liegt Φ_W bei $\pi/4$. Es ist zu bemerken, dass die Definition von Φ_W eine Ana-

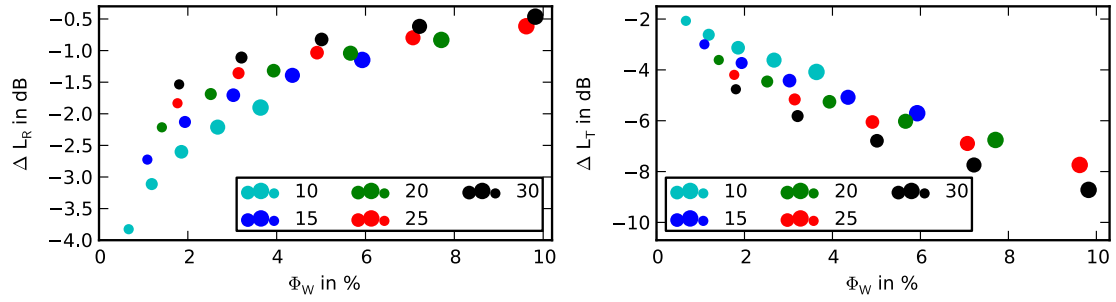


Abb. 4.5.: Schallpegel der relativen Reflexion ΔL_R (links) und Transmission ΔL_T (rechts) gegenüber der Walddichte Φ_W . In der Legende wird die variierte Stammdichte D_W (in Stämme/(100 m²)) in verschiedenen Farben gekennzeichnet. Die Größe der Punkte entspricht dem dazugehörigen Stammradius R_S (von 0.15 m bis 0.35 m).

logie auf die vorgestellten Variablen Φ_V und Φ_{FA} in Kapitel 3 aufweist. In den Studien von Sánchez et al. (1998) und von Martínez-Sala et al. (2006) wurde ebenfalls ein ähnlicher Parameter benutzt (engl. filling fraction), in denen der Streuungs- und Beugungseffekt an 2-D Zylindern untersucht wurden. Die relativen Pegelwerte der Reflexion bzw. Transmission werden nun in Abb. 4.5 gegenüber Φ_W dargestellt, um die Abhängigkeit zu untersuchen. Es ist ersichtlich, dass mit zunehmender Walddichte Φ_W die relative Reflexion ΔL_R zunimmt und die relative Transmission ΔL_T abnimmt. Die Datenpunkte zeigen jeweils eine ähnliche Verteilung zu den vorgestellten Ergebnissen in Abb. 3.20 und Abb. 3.21.

4.2.2. Schalluntersuchung hinsichtlich der Walddtiefe

Um die Einflüsse der Walddtiefe auf die Schallausbreitung zu untersuchen, werden Simulationen mit Waldstreifen in unterschiedlichen Ausdehnungen d_W von 10 m bis 80 m (in x -Richtung) durchgeführt. Der Stammradius $R_S = 0.25$ m und $D_W = 20$ Stämme/(100 m²) werden beibehalten. Ähnlich wie die oben vorgestellten Simulationen werden für jede untersuchte Walddtiefe sechs Waldstreifen nach dem Zufallsprinzip erzeugt und damit die Ausbreitung der Schallpartikel berechnet. Diese sechs Waldstreifen unterscheiden sich nur durch die Verteilung der Stämme. Die empfangenen Schallpartikel bei $x = 0$ bzw. $x = x_1$ werden über die sechs Simulationen und danach über die 20 Verteilungsintervalle in y -Richtung arithmetisch gemittelt, analog zu dem in Abschnitt 4.2.1 erläuterten Verfahren. Die relativen Pegelwerte der Reflexion bzw. Transmission in Abhängigkeit von d_W werden in Abb. 4.6 dargestellt. Die Verteilung der Reflexion ΔL_R zeigt einen nichtlinearen Verlauf. Im Gegensatz dazu ist die Verteilung der Transmission ΔL_T annähernd linear. Mit zunehmender Walddtiefe nimmt die Reflexion zu und die Transmission ab, wobei die Zunahme der Reflexion deutlich schwächer ist als die Abnahme der Transmission (bezogen auf den betrachteten Bereich der Walddtiefe). Wenn die Walddtiefe gegen Null geht, ergibt sich eine unendlich geringe Reflexion und eine hohe Transmission, was einer Ausbreitung im Freien entspricht. In dem anderen Extremfall mit einer sehr hohen Walddtiefe (in diesem Rechengebiet bis maximal 100 m), werden $\Delta L_R \rightarrow 0$ dB und $\Delta L_T \rightarrow -\infty$ dB erwartet.

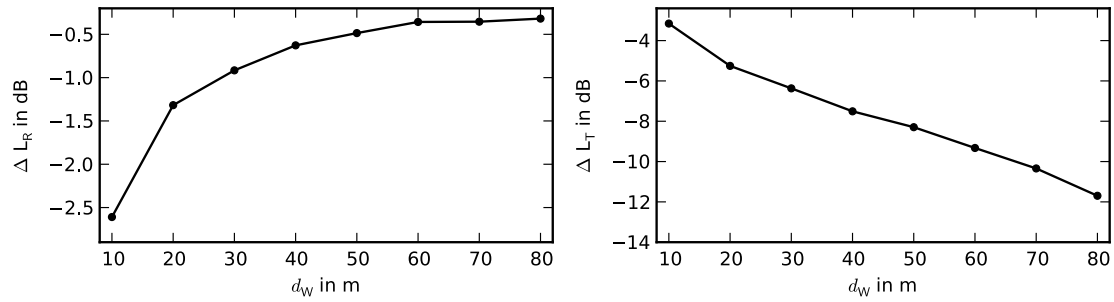


Abb. 4.6.: Schallpegel der relativen Reflexion ΔL_R (links) und Transmission ΔL_T (rechts) gegenüber der Waldtiefe d_W . Die verwendeten Parameter betragen $R_S = 0.25$ m und $D_W = 20$ Stämme/(100 m²).

4.2.3. Schalluntersuchung hinsichtlich des Reflexionsgrades

In den bisherigen Simulationen wurde eine Totalreflexion an den (schallharten) Stämmen angenommen. Ein Schallpartikel trug nach mehrfacher Reflexion immer noch dieselbe Energie wie ein ungehinderter Schallpartikel. In der Praxis ist es jedoch anzunehmen, dass der Schall beim Auftreffen auf Baumstämme einen Teil der Energie verliert, wie z. B. durch poröse Baumrinden. In diesem Fall wird der Reflexionsgrad der Stämme β_S berücksichtigt, welche das Verhältnis der reflektierten Energie zu der einfallenden Energie beschreibt. Der Reflexionsgrad liegt zwischen 0 und 1. Die Untergrenze $\beta_S = 0$ bedeutet eine Totalabsorption an den Stämmen und die Obergrenze $\beta_S = 1$ eine Totalreflexion. Für einen Schallpartikel besteht zwischen der Energie an der Emission E_E und der Energie an der Immission E_I die folgende Funktion

$$E_I = \beta_S^n \cdot E_E, \quad (4.9)$$

mit n der Häufigkeit der Reflexion. Damit wird der Immissionspegel eines Schallpartikels von dem Reflexionsgrad und der Häufigkeit der Reflexion abhängig. Eine zuvor vorgestellte Simulation, mit $R_S = 0.25$ m und $D_W = 20$ Stämme/(100 m²), wird erneut betrachtet, indem die empfangene Energie anhand der Gl. (4.9), mit einem variierenden Reflexionsgrad von 0 bis 1, gewichtet wird. Die relativen Pegelwerte der Reflexion bzw. Transmission werden gemäß den Gln. (4.4) und (4.5) ausgewertet und gegenüber dem Reflexionsgrad in Abb. 4.7 dargestellt. Sowohl die Reflexion als auch die Transmission nehmen mit abnehmendem Reflexionsgrad ab. Bei $\beta_S = 1$ ergeben sich $\Delta L_R = -1.3$ dB und $\Delta L_T = -5.3$ dB. Diese Werte entsprechen den bereits gezeigten Ergebnissen in Abb. 4.5 (grüner Punkt mit einem mittleren Radius). Bei $\beta_S = 0$ wird eine sehr geringe ΔL_R (bis $-\infty$) erwartet, was einer Ausbreitung im Freien entspricht. Im Gegensatz dazu liegt ΔL_T bei -13.4 dB. Dies ergibt sich durch die Schallpartikel, die durch den Waldstreifen ohne Reflexion an Stämmen passieren und von der Veränderung des Reflexionsgrades nicht beeinflusst sind.

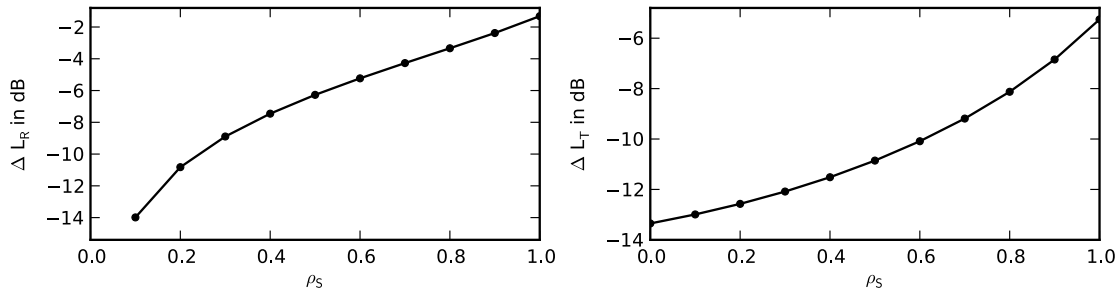


Abb. 4.7.: Schallpegel der relativen Reflexion ΔL_R (links) und Transmission ΔL_T (rechts) gegenüber dem Reflexionsgrad der Stämme β_S . Die verwendeten Parameter betragen $R_S = 0.25$ m und $D_W = 20$ Stämme/(100 m²).

4.3. Diskussion

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Einflüsse von Waldstreifen in Hinsicht von Walddichte, -tiefe und Reflexionsgrad der Stämme untersucht. Eine deutliche Abhängigkeit der Reflexion bzw. Transmission von der Flächendichte des Waldes Φ_W wurde beobachtet (siehe Abb. 4.5). Die Rechenergebnisse weisen eine ähnliche Verteilung auf wie die mittels *AKU3D* (FDTD-Modell) berechneten Ergebnisse in Kapitel 3. Parallel zu Abschnitt 3.3 werden hierfür die Regressionsfunktionen berechnet

$$\Delta L_R = -4.44 \lg\left(1 + \frac{3.83}{\Phi_W}\right) \quad (4.10)$$

$$\Delta L_T = -6.66 \lg(1 + 1.45 \cdot \Phi_W) . \quad (4.11)$$

Die quadratischen Mittelwerte der Fehler bezüglich der Rechenergebnisse betragen jeweils für Reflexion $\varepsilon_R = 0.3$ dB und für Transmission $\varepsilon_T = 0.5$ dB. Die Regressionsfunktionen sind mit den Rechenergebnissen in Abb. 4.8 dargestellt. Gleichzeitig sind die mittels des FDTD-Modells ermittelten Regressionsfunktionen (gegenüber dem Volumenanteil Φ_V von Baum) im Diagramm angezeigt. Eine ähnliche Tendenz zwischen den Kurven dieser zwei Modelle wird beobachtet. Mit zunehmender Φ_V bzw. Φ_W nimmt die Reflexion zu und die Transmission ab.

Die Reflexion wird mit dem Partikelmodell gegenüber dem FDTD-Modell überschätzt. Dies liegt an den impliziten Eigenschaften des Schallpartikelmodells, dass sich die Schallpartikel ausschließlich gradlinig ausbreiten und dadurch empfindlich gegen Hindernisse (unabhängig von der Größe) sind. Im Gegensatz dazu simuliert das FDTD-Modell die Ausbreitung von Schallwellen, welche an den relativ kleinen Hindernissen (bezogen auf die Wellenlänge) passieren können. Je geringer die betrachtete Wellenlänge (d. h. höhere Frequenzen), desto geringer ist der Fehler im Partikelmodell. In physikalischer Hinsicht werden im Partikelmodell der Reflexions- und Absorptionseffekt behandelt, während im FDTD-Modell zusätzlich noch der Streuungs- und Beugungseffekt berücksichtigt werden. Ebenfalls aus diesem Grund wird die Transmission von dem Partikelmodell gegenüber dem FDTD-Modell unterschätzt.

Es wird darauf hingewiesen, dass die o. g. Regressionskurven mit Hilfe von der Metho-

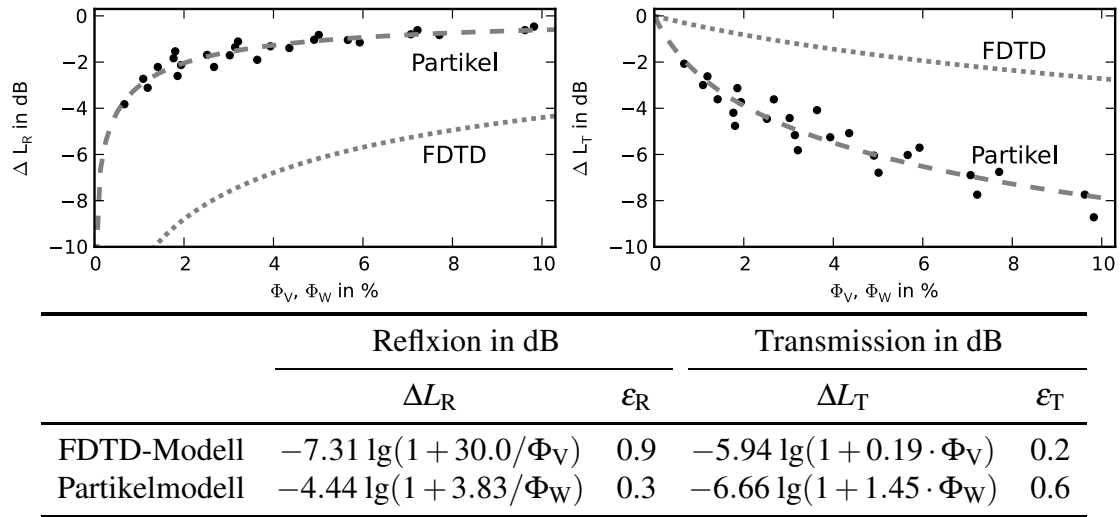


Abb. 4.8.: Vergleich der Rechenergebnisse des Partikelmodells und FDTD-Modells. Links — Pegel der relativen Reflexion ΔL_R ; rechts — Pegel der relativen Transmission ΔL_T ; Punkte — Rechenergebnisse des Partikelmodells; gestrichelte Kurve — Regressionskurve des Partikelmodells; gepunktete Kurve — Regressionskurve des FDTD-Modells. In der Tabelle sind die Regressionsfunktionen und die quadratischen Mittelwerte der Fehler dieser Modelle gegenüber aufgelistet.

de der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt wurden, wozu eine Schätzfunktion f angenommen wurde

$$\text{für } \Delta L_R : f_R(x) = c_{1,R} \lg\left(1 + \frac{c_{2,R}}{x}\right) \quad (4.12)$$

$$\text{für } \Delta L_T : f_T(x) = c_{1,T} \lg(1 + c_{2,T} \cdot x), \quad (4.13)$$

wobei $c_{1,2}$ die zu suchenden Koeffizienten und x die angenommenen Variablen (Bauparameter Φ_V bzw. Waldparameter Φ_W) sind. Die Indizes R und T bezeichnen jeweils die Reflexion und Transmission. Die Wahl der Schätzfunktion in logarithmischer Form wurde deshalb getroffen, weil die gesuchte Größe $\Delta L_{R,T}$ ebenfalls eine logarithmische Funktion der Schallenergie $E_{R,T}$ ist

$$\Delta L_R = 10 \lg \frac{E_R}{E_{FF}} \quad (4.14)$$

$$\Delta L_T = 10 \lg \frac{E_T}{E_{FF}}, \quad (4.15)$$

mit E_{FF} der Schallenergie der Ausbreitung im Freien. Nach dem Auflösen der Gln. von (4.12) bis (4.15) ergibt sich

$$\frac{E_R}{E_{FF}} = \left(1 + \frac{c_{2,R}}{x}\right)^{c_{1,R}/10} \quad (4.16)$$

$$\frac{E_T}{E_{FF}} = (1 + c_{2,T}x)^{c_{1,T}/10}. \quad (4.17)$$

Daraus kann man aufgrund des minus Vorzeichens von $c_{1,R,T}$ und des plus Vorzeichens

von $c_{2,R,T}$ (siehe die Tabelle in Abb. 4.8) ableiten, dass die reflektierte Schallenergie proportional und die transmittierte Schallenergie umgekehrt proportional zu dem Baum- bzw. Waldparameter ist.

In diesem Kapitel wurden die Einflüsse eines ganzen Waldstreifens mittels des eigenentwickelten Schallpartikelmodells parametrisiert. Das Partikelmodell behandelt den Reflexions- und Absorptionseffekt und eignet sich gut für Untersuchungen im hohen Frequenzbereich. Die Rechenergebnisse weisen eine Analogie zu den des FDTD-Modells auf. Im Gegensatz zu dem Modell von Huisman und Attenborough (1991), in dem stochastische Ansätze für das Verhalten eines Schallpartikels (die Wahrscheinlichkeit und die Richtung einer Reflexion) verwendet werden, erfolgt in diesem Modell die Reflexion eines Schallpartikels gemäß der Spiegelreflexion konkret mit gegebener Dichte und Verteilung sowie mit gegebenem Radius der Stämme. Damit ist das Modell intuitiver und nachvollziehbarer.

5. Feldexperiment mit Geräuschen von Zugvorbeifahrten

In diesem Kapitel werden mittels Messungen die Waldeffekte untersucht. Darüber liegen in der Literatur bereits einige Messwerte vor, welche jedoch in Hinsicht der Messkonstellationen und Ausbreitungsbedingungen stark variieren, siehe Abschnitt 5.5. Das Feldexperiment in dieser Arbeit dient zu dem Zweck, die Waldeffekte in der Natur zu quantifizieren, und vor allem die Daten von Ausbreitungsbedingungen für die Simulationen in Kapiteln 6 und 7 zu erheben.

Die Annahme des Feldexperiments lautet, dass der Schall im Wald stärker gedämpft wird als auf einem offenen Gelände unter den vergleichbaren Ausbreitungsbedingungen. Um dies signifikant nachzuweisen, wird eine Messstrecke von über 100 m konzipiert. Eine ausreichend starke, wiederholt auftretende Schallquelle in Waldnähe ist für das Experiment erforderlich, damit die Schalldämpfung des Waldes eindeutig charakterisiert werden kann. Zur Ermittlung der Dämpfung wird der Schalldruckpegel sowohl in Quellnähe als auch in einer definierten Entfernung gemessen; mit dem ersteren wird die Emission bestimmt und mit dem letzteren die Immission. Die Differenz dieser zwei Messwerte ergibt die Ausbreitungsdämpfung, welche sämtlich wirkende Dämpfungseffekte repräsentiert, wie z. B. Dämpfung aufgrund geometrischer Ausbreitung, siehe Gln. (2.26) und (2.27). Um die Ausbreitungssituation zu dokumentieren, werden gleichzeitig die meteorologischen Größen (Wind, Feuchte etc.) erfasst. Ebenfalls werden die Eigenschaften des Bodens und des Waldes vermerkt.

Um die Waldeffekte von den anderen zu trennen, behilft man sich mit Vergleichsmessungen. Die Ausbreitungsdämpfung wird auf einer Messstrecke im Wald (Versuchsmessung) sowie auf einer anderen vergleichbaren Messstrecke auf offenem Gelände (Kontrollmessung) ermittelt. Der Vergleich dieser zwei Werte ergibt die durch den Wald hervorgerufene Dämpfung. Hierin sind sowohl die direkten als auch die indirekten Effekte des Waldes enthalten. Eine Identifizierung der einzelnen Effekte ist im Feldexperiment nicht möglich.

Es ist besonders zu beachten, dass die Ausbreitungsbedingungen unter den Versuchs- und Kontrollmessungen möglichst gleich bleiben, um die Waldeffekte genau zu quantifizieren. Dies wird im darauf folgenden Abschnitt erläutert. Im Anschluss daran werden die Auswertung und die Ergebnisse des Feldexperiments präsentiert. Mögliche Messfehler werden in Abschnitt 5.4 diskutiert. Zum Schluss werden die Messergebnisse mit den Angaben aus anderen Studien verglichen.

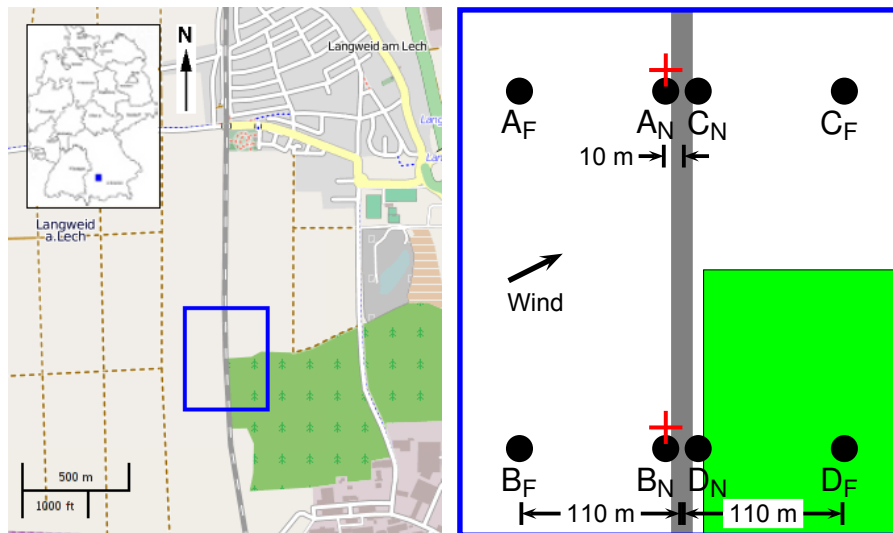


Abb. 5.1.: Landkarte des Messgeländes (links) und Skizze des Versuchsaufbaus (rechts): In der Skizze kennzeichnet der graue Streifen die Bahngleise, die grüne Fläche den Wald, die roten Kreuze die Messpunkte für Meteorologie und die schwarzen Punkte die Messpunkte für Akustik; Index N bezeichnet die quellnahe Position und F die Ferne. Quelle der Karte: OpenStreetMap contributors, CC BY-SA.

5.1. Versuchsaufbau und -durchführung

Für das Feldexperiment wurde die Eisenbahnstrecke in Langweid am Lech, zwischen Augsburg und Donauwörth, ausgesucht, siehe Abb. 5.1 links. Der geradlinige Verlauf eignet sich besonders gut dafür, weil unerwünschte Geräusche des Zuges wie plötzliches Bremsen und Beschleunigen hier seltener auftreten. Auf dieser Strecke verlaufen zwei Gleise. Auf dem Westlichen verkehren Züge von Norden nach Süden und auf dem östlichen umgekehrt.

Auf der Ostseite der Bahnstrecke befindet sich ein Wald mit einer Länge und Breite von über 600 m. Nördlich des Waldes sowie die gesamte Westseite der Bahnstrecke sind verschiedene Anbauflächen. Das Gelände im Umkreis von einem Kilometer weist einen Höhenunterschied von weniger als 5 m auf.

In diesem Experiment wurden vier Messstrecken A, B, C und D konzipiert, siehe Abb. 5.1 rechts. Durch die Messstrecken A und B wurde der meteorologische Einfluss auf die Schallausbreitung in Gegenwind untersucht, da ein Südwestwind herrschte. In der Messstrecke B konnte man vermutlich einen durch den Wald angestauten Wind beobachten. Der Einfluss des Waldes bei Mitwind wurde durch die Messstrecken C und D ermittelt. Zudem konnte die Ausbreitung im Freien bei Gegen- bzw. Mitwind verglichen werden, indem man die Messstrecken A und C gegenüberstellte.

In jeder Messstrecke wurde die Schallimmission in einer Entfernung von 10 m und 110 m zu den Gleisen gemessen. Zwei stationäre Messgeräte vom Hersteller *Topsonic*¹ wurden westlich der Gleise (in Abb. 5.1 mit rotem Kreuz gekennzeichnet) auf-

¹*Topsonic* Fluglärmmessstelle, ausgestattet mit einem Wettermesswertgeber *Vaisala WXT510*, einem Au-



Abb. 5.2.: Aufbau des Versuchsstands; links — stationäres Gerät an B_N , mit der Meteorologieeinheit und dem Schallpegelmesser auf 2 m über Grund; rechts — mobiles Gerät an D_F , mit dem Schallpegelmesser auf 1.5 m über Grund.

gebaut. Diese verfügen über eine Meteorologieeinheit und einen Schallpegelmesser. Die Messsonden wurden technisch bedingt 2 m über Grund befestigt. Die hiermit gemessenen Schalldruckpegel galten als Referenz für Messwerte an den anderen Messpunkten. Zwei weitere mobile Messgeräte mit Schallpegelmesser vom Hersteller *Norsonic*² wurden an verschiedenen Messpunkten (mit schwarzem Punkt gekennzeichnet) in einer Höhe von 1.5 m positioniert. Abb. 5.2 zeigt beispielsweise den Versuchsstand eines stationären Gerätes an B_N und eines Mobilen an D_F .

Das Experiment wurde am 28.07.2010, einem wolkenigen Tag, zwischen 9 und 14 Uhr durchgeführt. Während dieser Zeit gab es weitgehend keine landwirtschaftlichen Aktivitäten auf den Anbauflächen oder sonstigen andauernden Störgeräusche in der Umgebung. Von der Bundesstraße B2, 1100 m östlich der Gleise entfernt, waren keine hörbaren Fahrzeuggeräusche bemerkbar. Sporadische Störgeräusche wie z. B. Flugzeuggeräusche wurden notiert. Alle Zugvorbeifahrten wurden mit einer Videokamera aufgenommen, wodurch die Zuggattung und -länge, die Fahrtrichtung und die Fahrgeschwindigkeit bestimmt wurden. Zusätzlich wurden die Zugvorbeifahrten separat protokolliert, um die zeitliche Zuordnung der Videoaufnahme und der Messdaten besser zu gewährleisten. Dadurch kann z. B. das Ereignis zweier sich begegnender Züge in der Auswertung korrekt berücksichtigt werden.

Die Luftschichtung wurde aufgrund mangelnden Sonnenscheins und konstanten Windes in Stärke 2 bis 3 nach Beaufortskala (d. h. Windgeschwindigkeit von 1.6 m/s bis 5.5 m/s) als neutral eingeschätzt. Aufgrund einsetzenden Regens endete die letzte Messung um 13:30 Uhr.

Da im Rahmen dieser Arbeit nur vier Messgeräte zur Verfügung standen, wurden die Messungen etappenweise in Messperioden I bis IV durchgeführt, siehe Tab. 5.1. Hierin steht *sta* für die stationären Geräte und *mob* für die Mobilen. Aus zeitlichen Gründen wurden die Messkombinationen von C_N/C_F sowie D_N/D_F nicht realisiert. Denn der Umbau

Benmikrofon G.R.A.S. Typ 41AM und einem Schallpegelmesser *Norsonic Nor118*.

²*Norsonic* Schallanalysator *Nor121*, Genauigkeitsklasse 1 nach DIN IEC 60651.

Tab. 5.1.: Positionierung der Mikrofone und Anzahl der gemessenen Ereignisse innerhalb der Messperioden I bis IV. *sta1* und *sta2* bezeichnen die stationären Geräte, *mob1* und *mob2* bezeichnen die mobilen Geräte.

Messperiode	Uhrzeit	<i>sta1</i>	<i>sta2</i>	<i>mob1</i>	<i>mob2</i>	Anzahl der gemessenen Ereignisse
I	09:50 – 10:30	A _N	B _N	A _N	B _N	6
II	10:30 – 11:20			A _F	B _F	11
III	12:00 – 12:45			C _N	D _N	9
IV	12:45 – 13:40			C _F	D _F	9

von *mob1* und *mob2* würde knapp eine Stunde in Anspruch nehmen. Insgesamt wurden in Messperiode I sechs Schallereignisse gemessen, in Messperiode II elf und in Messperiode III und IV jeweils neun. Neben den akustischen Messdaten lieferten die stationären Messgeräte meteorologische Messdaten ununterbrochen über den gesamten Zeitraum.

Die Positionierung der Messgeräte erfolgte vor Ort mit Hilfe eines GPS-Handgerätes. Die geplanten Entfernungen der Messgeräte zu den Gleisen, jeweils 10 m und 110 m, wurden soweit wie möglich eingehalten. Die Mikrofone in der Ferne wurden nach Augenmaß so positioniert, dass sie mit den Mikrofonen in Quellnähe eine senkrechte Linie zu den Gleisen bilden. Wegen der Begebenheiten vor Ort musste die Aufstellung individuell angepasst werden. Die geografischen Daten der Aufstellpositionen wurden mit dem GPS-Handgerät vermerkt.

Die Schallpegelmesser wurden mit dem Kalibrator *Nor-1251*³ am Messtag kalibriert. Für eine genaue Auswertung der akustischen Messwerte ist deren zeitliche Übereinstimmung besonders wichtig. Die Uhrzeit der Messgeräte wurde unmittelbar vor dem Experiment mit Hilfe einer Uhr sekundengenau eingestellt. Im Laufe der Messungen stellte sich eine zunehmende Abweichung der Uhrzeit zwischen den Messgeräten heraus. Deshalb muss nachträglich in der Auswertung eine Synchronisierung erfolgen, siehe Abschnitt 5.3.

Hinsichtlich der Schallmessung wurden die zeitliche Bewertung auf S (engl. slow) und die Frequenzbewertung auf A eingestellt, siehe die Erläuterung auf Seite 9. Die Dauerschallpegel der Schallereignisse $L_{A,S}$ wurden im Sekundentakt in dB ausgegeben. Zusätzlich konnten die vom Mikrofon registrierten Schallsignale im WAV-Format aufgenommen werden. Die Funktion der Spektralanalyse in den Messgeräten stand zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht zur Verfügung, weshalb eine Kalibrierung der Tonaufnahme seitens des Anwenders nicht möglich war.

5.2. Datenerfassung

Position der Messpunkte

Nachträglich wurde das digitale Höhenmodell des Messortes im Gauß-Krügerschen Koordinatensystem von der Bayerischen Vermessungsverwaltung erworben, zum Zweck der

³Schallkalibrator Typ *Nor-1251* vom Hersteller *Norsonic*, Genauigkeitsklasse 1 nach DIN IEC 60651.

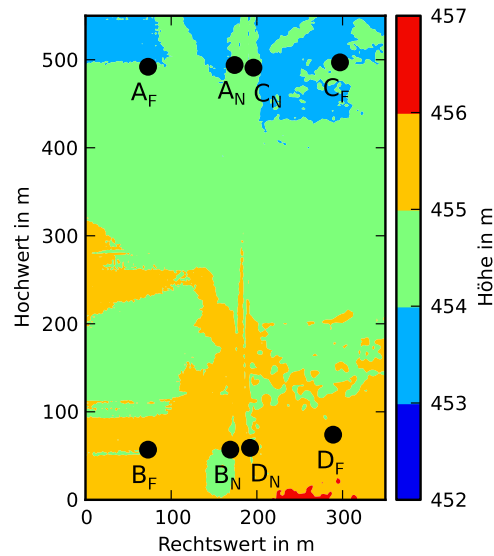


Abb. 5.3.: Digitales Höhenmodell des Messortes, Bezugspunkt an (4414750, 5371450) im Gauß-Krügerschen Koordinatensystem, Angaben in Meter. Messpositionen sind mit schwarzem Punkt markiert. Bodenhöhe über Normalnull ist gemäß der Farbskala dargestellt.

Simulation in Kapitel 6. Auf dem Höhenmodell wurden die mit dem GPS-Handgerät aufgezeichneten geographischen Daten (im UTM-Koordinatensystem) umgerechnet und damit die Messpositionen bestimmt, siehe Abb. 5.3. Die Entfernungen der Messpunkte zu den Gleisen, bezogen auf den Mittelpunkt beider Gleise, sind in Tab. 5.2 zusammengefasst.

Bodengegebenheiten und Vegetation

Bei der Begehung am Messgelände konnte man keine starke Unebenheit vorfinden. Die Messpunkte in Quellnähe, A_N, B_N, C_N und D_N, befanden sich in diversen Gräsern von Knie- bis Beinhöhe. Die Messpunkte A_F und C_F wurden auf Kartoffelfeldern aufgebaut und der Messpunkt B_F auf einem abgeernteten Feld (vermutlich Raps). Der Bereich um den Messpunkt D_F war bis zu D_N von Fichten bewachsen. Durch Stichproben wurde eine Walddichte von ca. 18 Bäume/(100 m²) festgestellt und ein Stammumfang in Brusthöhe zwischen 50 cm und 150 cm. Das entspricht einem Stammdurchmesser von ca. 16 cm bis 48 cm. Der Boden war vollkommen mit sehr niedrigem Bodengewächs und herabgefallenen Ästen und Nadelblättern überdeckt. Eine ausführliche Untersuchung hinsichtlich

Tab. 5.2.: Entfernungen der Messpunkte zu den Gleisen, Angaben in Meter. Die Entfernung bezieht sich auf den Mittelpunkt beider Gleise.

	A _F	A _N	B _F	B _N	C _F	C _N	D _F	D _N
Entfernung	113	12	110	14	111	10	106	9
Differenz der Entfernungen	101		96		101		97	

der akustischen Eigenschaften der Böden (wie z. B. Dicke und Porösität) wurde nicht durchgeführt.

Zugvorbeifahrten

Mit Hilfe der Videoaufnahmen wurden die Zugvorbeifahrten dokumentiert. Damit konnte man die Zuggattung, Fahrtrichtung und Fahrgeschwindigkeit bestimmen. Insgesamt wurden die Zuggattungen Intercity (IC), Intercity-Express (ICE), Regionalbahn (RB) und verschiedene Güterzüge in der Messung erfasst. Anhand der Fahrtrichtung wurde das befahrende Gleis erkannt, mit welchem die Entfernung vom Zug zum Mikrofon ermittelt wurde. Die Fahrgeschwindigkeit betrug bei den Personenzügen zwischen 95 km/h und 200 km/h und bei den Güterzügen zwischen 70 km/h und 115 km/h.

Meteorologie

Die meteorologischen Daten wurden sekundlich gemessen und der Mittelwert davon im Minutentakt gespeichert. Der Luftdruck lag konstant bei 96.5 kPa. Die Zeitverläufe der gemessenen Windrichtung, -geschwindigkeit, relativen Feuchtigkeit und Temperatur sind in Abb. 5.4 dargestellt. Die Windrichtung wurde als Gradzahl von 0° bis 360° im Uhrzeigersinn, mit 0° für Norden, angegeben. Während der Messungen herrschte ein südwestlicher Wind bei 240° mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s bis 4 m/s. An *sta1* (auf offenem Gelände) wurde eine höhere Windgeschwindigkeit als an *sta2* (vor dem Wald) gemessen, welches durch den Stau effekt des Waldes erklärbar ist. Das Gerät *sta1* weist eine um 5 % höhere relative Feuchtigkeit und eine um 1 °C niedrigere Temperatur gegenüber *sta2* auf. Grund dafür ist vermutlich die unterschiedliche Vegetation, Kartoffelfeld bei *sta1* und abgeerntetes Feld bei *sta2*, welche die Erwärmung des Bodens und gleichzeitig die Bilanz zwischen der Temperatur und Feuchtigkeit verändert.

Mittels der relativen Feuchtigkeit und der Temperatur wird die Luftdämpfung berechnet, wie im folgenden Abschnitt erläutert wird. Ferner werden aus den meteorologischen Messdaten die Randbedingungen zur Berechnung des Wind- bzw. Schallfeldes in Kapitel 6 abgeleitet.

Akustik

Eine Übersicht des Pegelverlaufs über alle Messperioden ist in Abb. 5.5 gezeigt. Die Schallereignisse messen zwischen 40 dB und 100 dB und das Hintergrundrauschen zwischen 25 dB und 40 dB. Die zwei hohen Pegel (in rot und orange) vor 10 Uhr entstehen durch die Selbstkalibrierung beim Hochfahren der Messgeräte. Ein ausführliche Auswertung der Schallereignisse wird in Abschnitt 5.3 erläutert.

Informationen des Frequenzspektrums wurden nicht direkt vom Schallpegelmessgerät ausgegeben, da diese Funktion am Gerät nicht zur Verfügung stand. Durch die Tonaufnahmen an den stationären Geräten ist dennoch eine Spektralanalyse der Schallereignisse möglich. Aus den im WAV-Format gespeicherten Daten wird mit Hilfe der

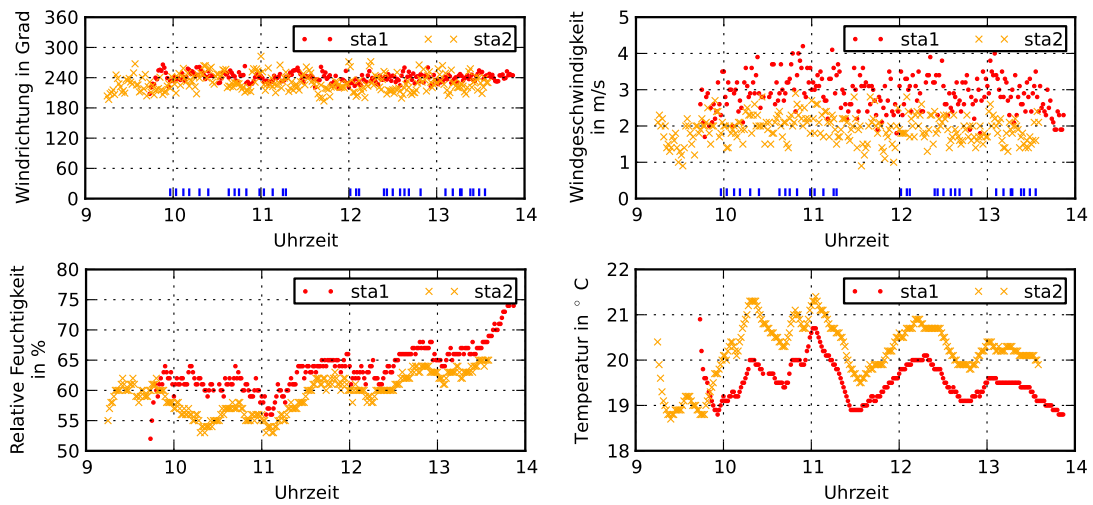


Abb. 5.4.: Meteorologische Messdaten in den Messperioden, erfasst am 28.07.2010. Oben links — Windrichtung in Grad, im Uhrzeigersinn zunehmend, 0 Grad für Norden; oben rechts — Windgeschwindigkeit in m/s; unten links — relative Luftfeuchtigkeit in Prozent; unten rechts — Lufttemperatur in Grad Celsius. Die blauen Markierungen am unteren Rand im Diagramm der Windrichtung bzw. -geschwindigkeit bezeichnen die Zeitpunkte der Zugvorbeifahrten.

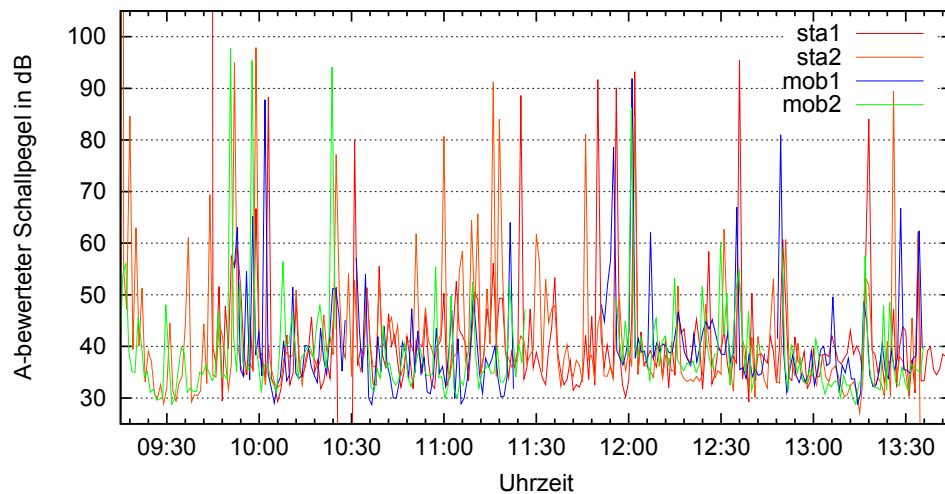


Abb. 5.5.: Zeitverlauf der gemessenen, A-bewerteten Schallpegel über die Messperioden. Die Messwerte der verschiedenen Messgeräte sind in verschiedenen Farben dargestellt.

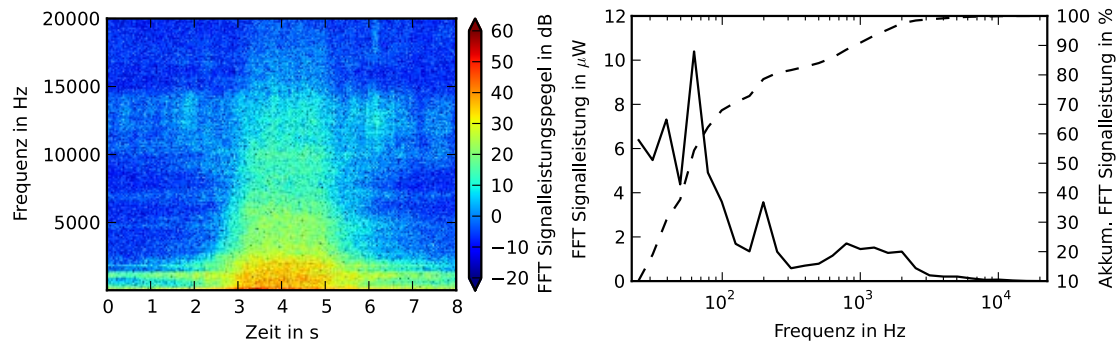


Abb. 5.6.: Spektralanalyse der Tonaufnahme um 10:08 Uhr an *sta1*, verursacht durch eine Regionalbahn nach Süden. Links — Spektrum des Schallsignals, die Signalleistung in Farbskala dargestellt; rechts — Spektrum der Signalleistung, berechnet über den betrachteten Zeitraum von 8 s (durchgezogene Kurve) bzw. weiter akkumuliert über alle Frequenzen (gestrichelte Kurve).

Fast-Fourier-Transformation (FFT) das Spektrum der Signale berechnet. Aufgrund fehlender Kalibrierungsmöglichkeit der Aufnahmeeinheit kann das Frequenzspektrum aber nur in einer relativen Größe abgeleitet werden. Als Beispiel wird die Spektralanalyse der Tonaufnahme um 10:08 Uhr an *sta1*, einer Regionalbahn nach Süden, in Abb. 5.6 gezeigt. In dem Spektrogramm (links) sieht man andauernde Töne im Bereich von $f < 2$ kHz während der Zugvorbeifahrt. Bei $t = (3 \text{ bis } 5) \text{ s}$ treten breitbandige Geräusche auf, wobei die tiefen Frequenzen immer noch die höchsten Pegel aufweisen. Die Schallsignale in der Zeitspanne von einer Sekunde, in welcher der höchste Schalldruck registriert ist, wird gesondert der FFT unterzogen. Das Signalleistungsspektrum ist in Abb. 5.6 rechts dargestellt. Bei 400 Hz, 600 Hz und 2 kHz werden deutliche Töne (durchgezogene Kurve) beobachtet. Die gestrichelte Kurve zeigt die mit zunehmender Frequenz akkumulierte Signalleistung in %. Diese erreicht im Bereich $f \leq 2$ kHz bereits 80 % der gesamten Leistung. Die Spektralanalyse weiterer fünf Stichproben zeigt ebenfalls ein ähnliches Ergebnis darüber, dass die Geräusche der Zugvorbeifahrt hinsichtlich der Energie großteils aus tiefen Frequenzen bestehen.

Abschätzung der Ausbreitungsdämpfung

Die Dämpfung durch geometrische Ausbreitung und Luftabsorption sowie der Einfluss der Bodenreflexion in den Messstrecken werden in den folgenden Abschnitten abgeschätzt. Die Grundlagen hierfür wurden bereits in Abschnitt 2.1.2 erläutert.

Dämpfung durch geometrische Ausbreitung

Die geometrische Dämpfung über die individuelle Ausbreitungsentfernung der Messstrecken wird mit der analytischen Lösung einer Punkt- bzw. Linienquelle berechnet. Die Ausbreitungsentfernungen wurden bereits in Tab. 5.2 bestimmt. Die Pegelabnahme vom Emissionsort zum Immissionsort ist in Tab. 5.3 gegeben.

Tab. 5.3.: Geometrische Dämpfung (zwischen dem Nahfeld- und Fernfeldmikrofon) in den einzelnen Messstrecken, Angaben in dB. Die Ausbreitungsentfernung der Messstrecken wird aus Tab. 5.2 entnommen.

	Messstrecke A	Messstrecke B	Messstrecke C	Messstrecke D
Punktquelle	19.5	17.8	20.7	21.6
Linienquelle	9.8	8.9	10.4	10.8

Dämpfung durch Luftabsorption

Die Dämpfung aufgrund der Luftabsorption wird gemäß DIN ISO 9613-2 berechnet. Wegen der linearen Abhängigkeit von der Ausbreitungsentfernung wird die Luftdämpfung durch den Dämpfungskoeffizienten in dB/m ausgedrückt, welcher sich aus Frequenz, Luftfeuchtigkeit, -temperatur und -druck errechnet. Diese Parameter wurden mit den stationären Geräten während der Messungen erfasst. Da die Parameter nur eine geringe zeitliche Schwankung aufweisen, werden zur Berechnung die gemittelten Messwerte verwendet. Die Luftdämpfung in den einzelnen Messstrecken ist in Tab. 5.4 im Oktavband gezeigt. Die äquivalente Pegeldifferenz im betrachteten Frequenzbereich errechnet sich durch die folgende Mittelung

$$A_{\text{Luft,eq}} = 10 \lg \left[\frac{1}{\Delta f_{\text{ges}}} \sum_{i=1}^n (\Delta f_i \cdot 10^{L_i/10}) \right]. \quad (5.1)$$

Dabei bezeichnet Δf_i die Breite der jeweiligen Oktavbänder und $\Delta f_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^n \Delta f_i$ die Summe dieser. Ein Geräusch, welches eine gleichmäßige Amplitude im Frequenzbereich zwischen 60 Hz und 16 kHz besitzt, wird anhand der Tab. 5.4 um ca. 28 dB in 100 m Entfernung durch die Luftabsorption abgeschwächt. Enthält ein Geräusch überwiegend Tief- und Mittelfrequenzen, mit z. B. $f = (60 \text{ bis } 3500) \text{ Hz}$, so liegt die Abschwächung lediglich um ca. 2 dB in 100 m Entfernung.

Bodenreflexion

Unter der Annahme eines ebenen Geländes kann der Einfluss der Bodenreflexion anhand der Gl. (2.16) abgeschätzt werden. Dabei wird von Rad-Schiene-Geräuschen der Zugvorbeifahrten ausgegangen und die Quelle auf 0.172 m über Grund gesetzt, welche der Schienenoberkante entspricht. Eine Schallemission mit gleichmäßiger Amplitude im Terzband von (60 bis 3500) Hz wird verwendet. Die akustische Eigenschaft des Bodens wird durch den Strömungswiderstand im Bereich von $\sigma = (50 \text{ bis } 30000) \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ beschrieben. Dieser Wertebereich wird aus Embleton et al. (1983) entnommen und entspricht überschlägig verschiedenen Bodentypen von Wald- bis zu Asphaltboden, siehe den Auszug in Tab. 5.5.

Weiter wird der Immissionspegel in einer Entfernung von 110 m zur Quelle und einer Höhe von 1.5 m über Grund berechnet. Die durch die Bodenreflexion hervorgerufene Pegeldifferenz, definiert als der Schallpegel mit der Bodenreflexion im Vergleich zu

Tab. 5.4.: Berechnete Luftdämpfung in den einzelnen Messstrecken, in Abhängigkeit von den Frequenzen, Angaben in dB. Die Entfernung der Messstrecken wird aus Tab. 5.2 entnommen. Die verwendete Temperatur beträgt 20 °C und die relative Feuchtigkeit 60 %.

	Messstrecke A	Messstrecke B	Messstrecke C	Messstrecke D
63 Hz	0.0	0.0	0.0	0.0
125 Hz	0.0	0.0	0.0	0.0
250 Hz	0.1	0.1	0.1	0.1
500 Hz	0.3	0.3	0.3	0.3
1000 Hz	0.5	0.5	0.5	0.5
2000 Hz	0.9	0.9	0.9	0.9
4000 Hz	2.7	2.5	2.7	2.5
8000 Hz	9.3	8.8	9.3	8.9
16000 Hz	33.0	31.4	33.0	31.7
$A_{\text{Luft,eq}}$	28.9	27.5	28.9	27.8

Tab. 5.5.: Strömungswiderstand σ verschiedener Bodentypen, entnommen aus Embleton et al. (1983). Die Zahlenwerte wurden bestimmt durch Annäherungswerte im Delany-Bazley Modell an die akustischen Messwerten.

	Bodentyp	σ in $\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$
schallweich ↓	Schnee	10 – 50
	Waldboden	20 – 80
	Gras	150 – 300
	Sand	800 – 2500
	Kies, Schotter	1500 – 4000
schallhart	Asphalt	ca. 30000

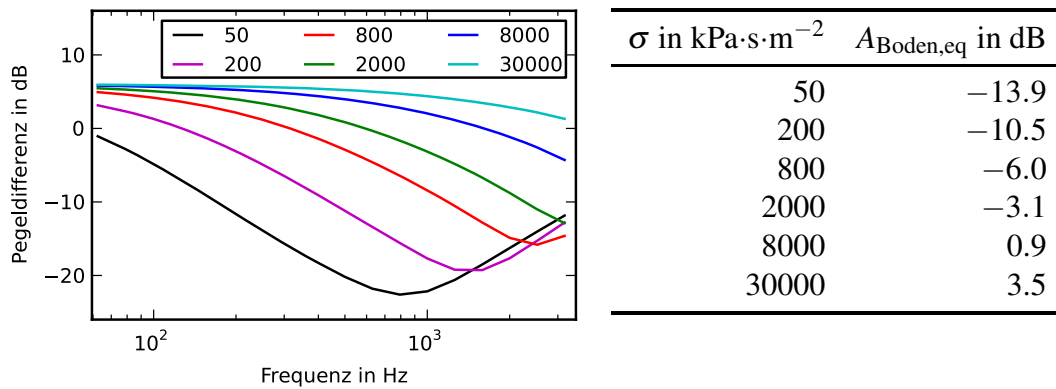


Abb. 5.7.: Berechnete Pegeldifferenz aufgrund der Bodenreflexion, definiert als der Schallpegel mit Bodenreflexion im Vergleich zu dem im Freifeld, $A_{\text{Boden}} = L_{\text{mit Boden}} - L_{\text{ohne Boden}}$. Die Höhe der Quelle beträgt 0.172 m, die des Empfängers 1.5 m und die Entfernung zwischen diesen 110 m. Der Strömungswiderstand σ liegt zwischen $50 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ und $30000 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$. Der entsprechende äquivalente Pegel (rechts) wird nach der Gl. (5.1) berechnet.

dem im Freifeld, $A_{\text{Boden}} = L_{\text{mit Boden}} - L_{\text{ohne Boden}}$, wird in Abb. 5.7 dargestellt. Ein positiver Wert bedeutet eine Schallverstärkung durch den Boden und ein negativer Wert eine Schalldämpfung. Bei den schallweicherer Böden, $\sigma = (50 \text{ bis } 800) \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$, wird die höchste Dämpfung im Frequenzbereich $f = (800 \text{ bis } 2500) \text{ Hz}$ beobachtet. Hier findet eine starke Auslöschung der direkt einfallenden Wellen durch die vom Boden reflektierten Wellen statt. Der unterste Kurvenbereich verschiebt sich mit zunehmendem Strömungswiderstand in Richtung hoher Frequenzen. Die äquivalente Pegeldifferenz über die angezeigten Terzbänder errechnet sich analog nach der Gl. (5.1). Folglich ergeben sich $A_{\text{Boden,eq}} = -13.9 \text{ dB}$ bei $\sigma = 50 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$, -10.5 dB bei $\sigma = 200 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ und -3.1 dB bei $\sigma = 2000 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$, siehe Abb. 5.7 rechts. Ein schallweicherer Boden kann im betrachteten Frequenzbereich den Immissionspegel viel stärker gegenüber einem schallhärteren Boden abschwächen.

5.3. Auswertung

In den folgenden Abschnitten werden die akustischen Messdaten aufbereitet, um die gesuchte Zusatzdämpfung des Waldes zu bestimmen. Die Daten werden hinsichtlich der zeitlichen Übereinstimmung und der Plausibilität überprüft. Als Beurteilungsgröße wird der maximale Pegelwert der jeweiligen Schallereignisse ermittelt. Die Beurteilungspegel werden hinsichtlich unterschiedlicher Höhe der Mikrofone korrigiert. Um die Schallereignisse unabhängig vom befahrenen Gleis miteinander zu vergleichen, ist eine Normierung der effektiven Ausbreitungsentfernungen auf 10 m bzw. 110 m zu unternehmen. Die einzelnen Dämpfungen unter verschiedenen Ausbreitungssituationen (Mit- bzw. Gegenwind, auf Feldern bzw. im Wald) werden berechnet. Damit wird die Zusatzdämpfung des Waldes, bezogen auf die Ausbreitung auf freiem Feld, bestimmt.

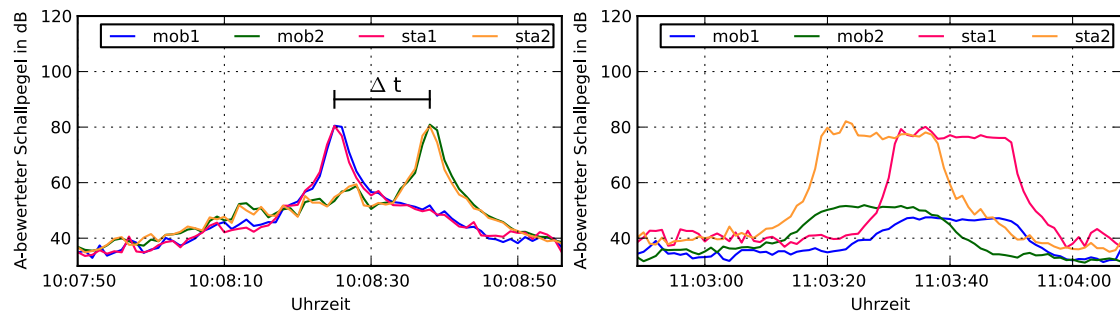


Abb. 5.8.: Pegelverlauf zweier typischer Schallereignisse: links — Regionalbahn um 10:08 (Messperiode I) nach Süden; rechts — Güterzug um 11:03 (Messperiode II) nach Norden.

5.3.1. Plausibilität und Auswahl der akustischen Messdaten

Um die Schallereignisse genau miteinander zu vergleichen, ist die zeitliche Übereinstimmung der aufgenommenen Schallsignale zwischen den Messgeräten besonders wichtig. Trotz der Synchronisierung im Vorfeld muss die Zeit der Messdaten vor der Auswertung berichtigt werden. Dazu wird der maximale Schallpegel der jeweiligen Schallpegelmesser als Richtwert ausgesucht. Dem Zeitpunkt dieses Richtwertes entsprechend wird die Zeitachse der Schallpegelmesser verschoben. Dies erfolgt einmal in den jeweiligen Messperioden.

Die akustischen Messwerte sind im Sekundentakt ausgegeben, siehe Abb. 5.5. Zeitintervalle mit einem deutlich erhöhten Pegelwert werden eingehend analysiert und mit Hilfe der Tonaufnahme den registrierten Schallereignissen zugeordnet. Abb. 5.8 zeigt den Verlauf zweier typischer Schallereignisse. Die Zeitverschiebung Δt zwischen den Kurven führt auf die Entfernung zwischen den Messpunkten im Norden und Süden zurück und hängt von der Fahrgeschwindigkeit des Zuges ab. Aufgrund unterschiedlicher Zeitspannen der Schallereignisse und zeitweise bemerkbaren Hintergrundrauschens empfiehlt sich die Auswertung mit dem maximalen Pegel L_{\max} statt dem zeitlich gemittelten, äquivalenten Pegel L_{eq} . Damit ist implizit eine dominierende Punktquelle als Schallemission anzunehmen. Sonstige Schallquellen, wie z. B. andere Räder, Schienen, Lüfter, Antriebsgeräusche und aerodynamische Geräusche, werden nicht mitberücksichtigt. Diese Auswertung hat ferner den Vorteil, dass die Ausbreitungsrichtung eindeutig identifizierbar ist. Würde L_{eq} zur Auswertung verwendet, würde die Länge des begangenen Schallwegs während der Vorbeifahrt variieren. Folglich wäre die Bestimmung der Walddämpfung in Bezug auf eine definierte Länge schwierig.

In einigen Schallereignissen tritt der maximale Pegel in der nördlichen Messstrecke zu einem anderen Zeitpunkt auf als in der Südlichen, wie in Abb. 5.9 dargestellt. Ursache können unbekannte akustische Eigenschaften der Schienen sein. In diesem Fall wird der maximale Pegel, welcher in mindestens zwei Messstrecken ähnlich vorkommt, zur Auswertung genommen und für die anderen Messstrecken der Pegel an der zeitlich entsprechenden Stelle.

Auf eine Auswertung von Schallereignissen mit deutlich störenden Fremdgeräuschen, wie z. B. Flugzeuggeräuschen, wird verzichtet. Sollte ein Schallereignis durch entgegenfahrende Züge verursacht sein, wobei die dominierende Emission (westlich oder östlich)

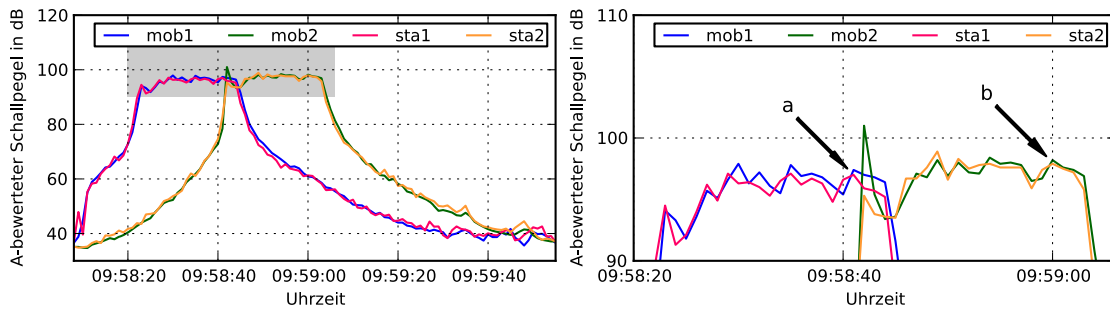


Abb. 5.9.: Individuelle Auswahl des Kennwertes der Immissionspegel: links — Schallereignis um 09:58 in Messperiode I, Zeitpunkt maximalen Pegels in einzelnen Messstrecken nicht übereinstimmend; rechts — Vergrößerung des schraffierten Bereichs, Kennwert individuell ausgewählt

nicht erkennbar ist, wird diese Messung nicht weiter ausgewertet. Somit werden in Messperiode I sechs Schallereignisse zur weiteren Auswertung ausgewählt und in Messperiode II, III und IV jeweils neun. Diese sind in Anhang B grafisch dargestellt.

5.3.2. Korrektur hinsichtlich unterschiedlicher Höhen

Da die Mikrofone technisch bedingt in unterschiedlichen Höhen angebracht sind, müssen die akustischen Messwerte nachträglich korrigiert werden. Hierzu wird die Höhe von 1.5 m als Bezug genommen (in Anlehnung an die vergangenen Studien, z. B. Kragh (1979, 1981) und Pal et al. (2000)). Betroffen sind die Messwerte der stationären Geräte. Der Korrekturpegel hinsichtlich der Höhe L_h wird aus den äquivalenten Schallpegeln der jeweiligen Mikrofone in der Messperiode I festgestellt

$$L_h = L_{eq, h=1.5 \text{ m}} - L_{eq, h=2 \text{ m}}, \quad (5.2)$$

wobei die äquivalenten Schallpegel L_{eq} gemäß der Gl. (2.10) bestimmt werden. Der Korrekturpegel L_h beträgt an Messpunkt A_N 0.6 dB und an B_N 0.2 dB. Die Messwerte der Geräte *sta1* und *sta2* werden mit dieser Korrektur versehen und dienen zur Referenz für die Messperioden II, III und IV.

5.3.3. Normierung hinsichtlich unterschiedlicher Entfernungen

Für jeden beliebigen Messpunkt ergeben sich je nach befahrenem Gleis (West oder Ost) unterschiedliche Ausbreitungsentfernungen, siehe die Skizze in Abb. 5.10. Hierin kennzeichnen E_W und E_O jeweils die west- und östliche Emission und E_M den Mittelpunkt dieser. Laut der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) beträgt der Gleisabstand (zwischen E_W und E_O) 4 m. Durch den Unterschied von 2 m, bezogen auf den bisher angenommenen Mittelpunkt der Gleise, wird innerhalb einer Messstrecke eine nicht vernachlässigbare Variation der Messwerte hervorgerufen. Grund dafür ist die nicht lineare Abhängigkeit der Pegelabschwächung von der Entfernung, wie bereits in Abb. 2.2 dargestellt. Dies trifft insbesondere bei den Nahfeld-Mikrofonen zu. Betrachtet man z. B. die

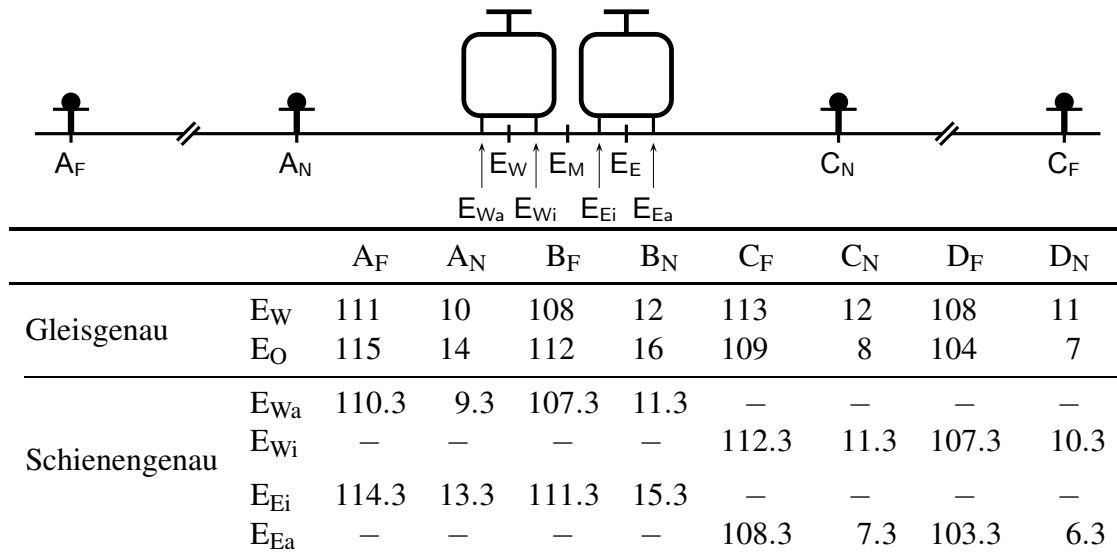


Abb. 5.10.: Betrachtung hinsichtlich unterschiedlicher, effektiver Entfernungen der nördlichen Messstrecken. Oben — Skizze zur Lage der Messpunkte relativ zu den Bahngleisen; unten — effektive Entfernung der Messpunkte zum Emissionsort, Angaben in Meter. Die Bezeichnungen E_W und E_O kennzeichnen jeweils die west- und östliche Emission, und E_M den Mittelpunkt dieser. Die Indices a und i kennzeichnen jeweils die äußere und innere Schiene des Gleises.

Messstrecke A, ergibt sich je nach dem befahrenen Gleis eine abweichende geometrische Dämpfung, welche anhand der Gl. (2.12) berechnet werden kann.

$$\text{Für Züge auf westlichem Gleis : } L_{A_N} - L_{A_F} = 10 \lg \frac{|E_W - A_F|^2}{|E_W - A_N|^2} = 20.9,$$

$$\text{für Züge auf östlichem Gleis : } L_{A_N} - L_{A_F} = 10 \lg \frac{|E_O - A_F|^2}{|E_O - A_N|^2} = 18.3.$$

Hierbei wird von der analytischen Lösung einer Punktquelle ausgegangen, da die maximalen Pegel L_{\max} ausgewertet werden. Demzufolge ist eine separate Berücksichtigung der Schallereignisse auf west- und östlichem Gleis erforderlich.

Um die Auswertung fortzuführen, werden die folgenden Annahmen getroffen: a) die Rollgeräusche stellen bei einer Zugvorbeifahrt die dominierende Schallquelle dar; b) die Geräusche werden gleichmäßig und symmetrisch zum Gleis emittiert. So wird als Emission dasjenige Rad definiert, welches die geringste Entfernung zu den jeweiligen Mikrofonen aufweist, siehe die Skizze in Abb. 5.10. Diesbezüglich wird die Ausbreitungsentfernung schienengenau ermittelt. Das heißt, die effektive Ausbreitungsentfernung ergibt sich aus dem Mikrofon und dem Rad auf der zugewandten Schiene. Für die Messpunkte auf der westlichen Seite (A_{F/N} und B_{F/N}) werden die Schienen E_{Wa} bzw. E_{Ei} als effektive Quellposition angenommen, siehe die Tabelle in Abb. 5.10; für die anderen Messpunkte (C_{F/N} und D_{F/N}) sind es die Schienen E_{Wi} bzw. E_{Ea}. Dabei kennzeichnen die Indices a und i jeweils die äußere und innere Schiene des Gleises.

Die effektiven Ausbreitungsentfernungen sind in der unteren Tabelle der Abb. 5.10 auf-

gelistet. Diese werden weiter normiert, um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Messstrecken zu erhalten. Das heißt, die Entfernung des Nahfeld-Mikrofons in der Messung $x_{m,N}$ soll auf 10 m normiert werden und die des Fernfeld-Mikrofons $x_{m,F}$ auf 110 m. Hierbei wird unter den in Abschnitt 2.1.2 besprochenen Dämpfungseffekten lediglich die geometrische Dämpfung angepasst. Denn es ist anzunehmen, dass sich die meteorologischen Bedingungen, die Bodenreflexion und vor allem die Luftabsorption durch die Verschiebung im Meterbereich nur sehr geringfügig ändern. Der Korrekturpegel der Normierung L_n wird aus der Entfernung in der Messung x_m und der normierten Entfernung x_n berechnet

$$L_n = 10 \lg \frac{x_m^2}{x_n^2}. \quad (5.3)$$

Individuell nach Messpunkt und befahrenem Gleis ergibt sich der korrigierte Pegel

$$L_{\text{norm}} = L_m + L_n, \quad (5.4)$$

mit L_m dem gemessenen Pegel. Die Normierungsvorgänge und die entsprechenden Korrekturpegel sind in Tab. 5.6 zusammengefasst. Hierzu werden die effektiven Ausbreitungsentfernungen aus Abb. 5.10 entnommen.

Die Korrektur wird für die Messperioden II, III und IV durchgeführt, damit die Ausbreitungsdämpfungen verschiedener Messstrecken besser vergleichbar sind. Für die Messperiode I ist die Korrektur nicht notwendig, da die Mess- und Referenzmikrofone paarweise an demselben Messpunkt positioniert waren. Die normierten Pegelwerte im gesamten Feldexperiment sind in Abb. 5.11 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Emissionspegel zwischen 75 dB und 100 dB liegen und die Immissionspegel im Fernfeld (*mob1* und *mob2* in den Messperioden II und IV) zwischen 40 dB und 70 dB. In der Messperiode II (bei Gegenwind) sind ähnlich hohe Immissionspegel auf offenem Gelände beobachtet.

Tab. 5.6.: Normierungsvorgänge und Korrekturpegel, Angaben der Entfernung in m, Angaben der Korrekturpegel in dB.

		A _F	A _N	B _F	B _N	C _F	C _N	D _F	D _N
effektive	E _{Wa}	110.3	9.3	107.3	11.3	—	—	—	—
Entfernung	E _{Wi}	—	—	—	—	112.3	11.3	107.3	10.3
normierte Ent- fernung	E _n	110.0	10.0	110.0	10.0	110.0	10.0	110.0	10.0
Korrekturpegel	L _n	0.0	−0.6	−0.2	1.1	0.2	1.1	−0.2	0.3
effektive	E _{Ei}	114.3	13.3	111.3	15.3	—	—	—	—
Entfernung	E _{Ea}	—	—	—	—	108.3	7.3	103.3	6.3
normierte Ent- fernung	E _n	110.0	10.0	110.0	10.0	110.0	10.0	110.0	10.0
Korrekturpegel	L _n	0.3	2.5	0.1	3.7	−0.1	−2.7	−0.5	−4.0

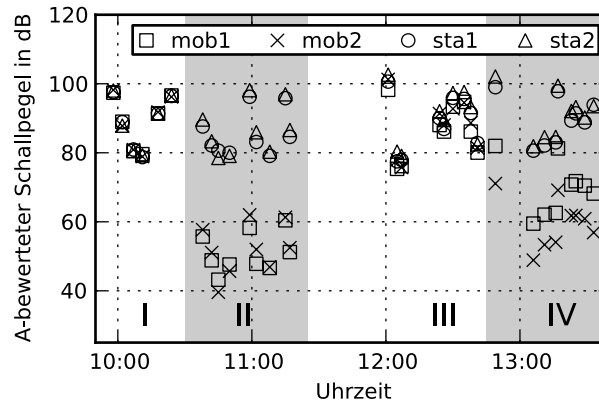


Abb. 5.11.: Normierte, gemessene Schallpegel in den Messperioden I bis IV. Die Ausbreitungsentfernungen der Nahfeldmikrofone sind auf 10 m normiert und die der Fernfeldmikrofone auf 110 m.

In der Messperiode IV (bei Mitwind) unterscheiden sich die Immissionspegel auf offenem Gelände (*mob1*) und die im Wald (*mob2*).

5.3.4. Bestimmung der Ausbreitungsdämpfung und Zusatzdämpfung

Aus den Ergebnissen in Abb. 5.11 werden die Pegeldifferenzen der Messmikrofone *mob1* und *mob2* zu den Referenzmikrofonen *sta1* und *sta2* ermittelt, siehe Tab. 5.7. Die Standardabweichung der Pegeldifferenzen $sd(\Delta L_{\text{norm}})$ ist den Messpunkten entsprechend dargestellt. Als Bezugswert zur Standardabweichung sind die minimalen und maximalen Pegelwerte, $\min(\Delta L_{\text{norm}})$ und $\max(\Delta L_{\text{norm}})$, ebenfalls angegeben. In der Messperiode III wird eine verhältnismäßig starke Schwankung der Pegelwerte bemerkt. Dies liegt vermutlich an einer asymmetrischen Schallemission am Zug, wie z. B. einem deutlich vernehmbaren Lüfter oder einem beschädigten Rad. Um repräsentative Schallpegel in den einzelnen Messperioden zu erhalten, wird der äquivalente Pegel ΔL_{eq} verwendet, welcher eine Mittelung auf Basis der Schallenergie vorsieht. Gemäß der Gl. (2.10) wird der äquivalente Pegel der oben genannten Pegeldifferenzen berechnet, siehe Tab. 5.7.

Tab. 5.7.: Auswertung der Pegeldifferenz der Messmikrofone im Vergleich zu den Referenzmikrofonen, Messwerte auf normierte Entfernungen korrigiert, Angaben in A-bewertetem Schallpegel in dB

	Messperiode II		Messperiode III		Messperiode IV	
	$L_{\text{AN}} - L_{\text{AF}}$	$L_{\text{BN}} - L_{\text{BF}}$	$L_{\text{AN}} - L_{\text{CN}}$	$L_{\text{BN}} - L_{\text{DN}}$	$L_{\text{AN}} - L_{\text{CF}}$	$L_{\text{BN}} - L_{\text{DF}}$
$sd(\Delta L_{\text{norm}})$	2.2	2.2	1.4	1.5	2.7	2.2
$\min(\Delta L_{\text{norm}})$	31.9	31.9	0.8	0.7	16.6	29.3
$\max(\Delta L_{\text{norm}})$	38.0	38.9	5.4	4.6	25.7	36.6
$\Delta L_{\text{norm,eq}}$	35.8	35.3	2.2	2.1	17.7	31.0

Zur Bestimmung der Ausbreitungsdämpfung wird die Pegeldifferenz zwischen dem Nahfeld-Mikrofon und dem Fernfeld-Mikrofon gebildet, $\Delta L_i = L_{i_N} - L_{i_F}$, mit i den Messstrecken A, B, C und D. Ein positiver Betrag drückt eine Pegelabnahme bzw. Dämpfung über die normierte Entfernung aus. Die dazu notwendigen äquivalenten Pegelwerte wurden bereits in Tab. 5.7 vorbereitet. Die Ausbreitungsdämpfungen der Messstrecken A und B sind direkt durch die Messperiode II gegeben. Die Ausbreitungsdämpfungen der Messstrecken C und D ergeben sich durch Abgleich der Messperioden III und IV. Diese errechnen sich wie folgt

$$\begin{aligned}\Delta L_C &= L_{C_N} - L_{C_F} = (L_{A_N} - L_{C_F}) - (L_{A_N} - L_{C_N}) \\ \Delta L_D &= L_{D_N} - L_{D_F} = (L_{B_N} - L_{D_F}) - (L_{B_N} - L_{D_N}).\end{aligned}$$

Hierbei handelt es sich um die äquivalenten Pegelwerte über normierte Entfernungen, wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert. Die Indices norm und eq werden wegen einer besseren Übersicht weggelassen. In Tab. 5.8 sind die Ausbreitungsdämpfungen der einzelnen Messstrecken dargestellt. Der Unterschied zwischen den Messstrecken A und B von 0.5 dB ist nicht signifikant, da dieser im Bereich der Messungenauigkeit liegt, welche im darauf folgenden Abschnitt erläutert wird. Ob der Wald einen reflektierenden Effekt in der betrachteten Entfernung hat, wird an dieser Stelle nicht geklärt. Die Dämpfung in der Messstrecke C ist um 20.3 dB/(200 m) niedriger gegenüber A. Dies ist auf den Einfluss des Windes zurückzuführen. Durch den Vergleich der Messstrecken C und D erhält man eine Dämpfungserhöhung durch den Wald

$$\Delta\Delta L_{\text{Wald}} = \Delta L_D - \Delta L_C = 13.3. \quad (5.5)$$

Diese Zusatzdämpfung (in dB/(100 m)) beinhaltet die einzelnen Dämpfungseffekte des Waldes im Vergleich zur Ausbreitungsdämpfung auf offenem Gelände (bei Mitwind) und gibt einen experimentellen Beweis auf die Gl. (2.28). Hiermit ist die Dämpfung des untersuchten Fichtenwaldes eindeutig quantifiziert.

Dank der aufgenommenen meteorologischen Daten ist es möglich, die Schalldämpfung hinsichtlich der Windeinflüsse gezielt zu untersuchen. Die Ausbreitungsdämpfung einzelner Schallereignisse in Abhängigkeit von der projizierten Windgeschwindigkeit wird in Abb. 5.12 dargestellt. Dabei wird die gemessene Windgeschwindigkeit entgegen der Ausbreitungsrichtung des Schalls projiziert. Diese sind in den Messstrecken A und B im

Tab. 5.8.: Ausbreitungsdämpfung ΔL über die normierten Entfernungen von 10 m und 110 m in den einzelnen Messstrecken, Angaben in A-bewertetem Schallpegel in dB

		Gegenwind		Mitwind	
	Messstrecke	ΔL	Messstrecke	ΔL	
Norden	A*	35.8	C*	15.5	
Süden	B*	35.3	D**	28.8	

* im Freien ** im Wald

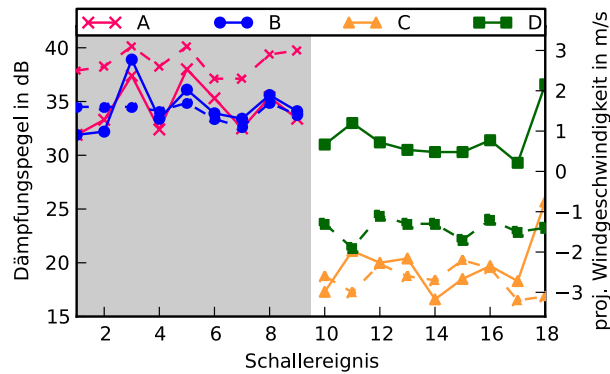


Abb. 5.12.: Abhängigkeit zwischen den gemessenen Dämpfungspegeln (durchgezogene Kurven) und projizierten Windgeschwindigkeiten (gestrichelte Kurven), Angaben der (A-bewerteten) Dämpfungspegel in dB, Angaben der Windgeschwindigkeit in m/s. Die gemessene Windgeschwindigkeit wird entgegen der Ausbreitungsrichtung des Schalls projiziert. Die Schallereignisse 1 bis 9 sind aus der Messperiode II entnommen, die Schallereignisse 10 bis 18 aus IV.

positiven Bereich und in Messstrecken C und D im negativen Bereich.

Die Korrelationskoeffizienten zwischen der Dämpfung und der Windgeschwindigkeit errechnet sich mit 0.7, 0.3, -0.4 und -0.1 , jeweils in der Messstrecke von A bis D. Ausreißer wie das dritte Schallereignis in den Strecken A und B sowie das zweite und letzte Schallereignis in den Strecken C und D schwächen die Korrelation besonders ab. Diese sind, nach Überprüfen der Messdaten in Anhang B, Züge der Regionalbahn bzw. eine einzelne Lok. Vermutlich weisen diese Schallereignisse bestimmte Eigenschaften der Emission auf, welche deutlich von den Annahmen der Auswertung abweichen (wie z. B. ein einseitiger, besonders lauter Lüfter, siehe die Diskussion in Kap. 5.4). Trotz der höheren Windgeschwindigkeit in A gegenüber B verhält sich die Dämpfung in diesen zwei Strecken ähnlich, siehe im Vergleich dazu Tab. 5.8. In den Messstrecken C und D ergeben sich negative Korrelationskoeffizienten aufgrund der Schallausbreitung bei Gegenwind. In D ist die Korrelation besonders schwach. Es ist zu schlussfolgern, dass die Dämpfung im Wald durch andere Einflüsse stärker geprägt wird als durch die Einflüsse des Windes.

5.4. Mögliche Messfehler

In diesem Feldexperiment können unvermeidliche Fehler aufgetreten sein. Sie bestehen möglicherweise aus folgenden Ungenauigkeiten:

Ungenauigkeit des GPS-Gerätes

Das verwendete GPS-Gerät ist, lt. den Angaben des Herstellers *GARMIN*, mit einer Ungenauigkeit von rund 5 m bis 15 m behaftet. Nach der eigenen Erfahrung liegt die Ungenauigkeit an einem trockenen Tag bei ca. 3 m. Von dieser Ungenauigkeit ausgegangen wird der Fehler anhand der Gl. (5.3) abgeschätzt. In dem einen Extremfall ($x_{m,N} = 7$ m

und $x_{m,F} = 113$ m) beträgt die geometrische Dämpfung 24.1 dB und in dem anderen ($x_{m,N} = 13$ m und $x_{m,F} = 107$ m) 18.3 dB. Im Vergleich zu den Ausgangsentfernungen ($x_{m,N} = 10$ m und $x_{m,F} = 110$ m) kann es eine Abweichung des Schallpegels von +3.3 dB bzw. -2.5 dB geben.

Ungenauigkeit durch die Annahme der Quellposition

In der Auswertung wurden symmetrische Rollgeräusche als Hauptemission der Vorbeifahrten vorausgesetzt. Diese Annahme trifft bei vielen Güterzügen zu. Ausnahmen wie z. B. ein beschädigtes Rad führen zu Fehlern in der Auswertung. Bei den Regionalbahn und ICE-Zügen spielen die Rollgeräusche nur eine untergeordnete Rolle, da bessere Bremsen eingesetzt werden, welche die Lauffläche der Räder wenig beanspruchen. An diesen Zügen sind oft andere Geräusche die dominierende Emission, wie z. B. die Lüftungsgeräusche oder die Antriebsgeräusche. Diese weisen jedoch eine asymmetrische Emission auf. Die dadurch verursachten Fehler in der Auswertung werden im Rahmen dieser Arbeit nicht explizit bestimmt.

Ungenauigkeit bei der Aufstellung der Meteo-Einheit

Mittels eines Handkompasses wurde die Richtung bestimmt und somit die Richtung der Meteo-Einheit nach Norden gestellt. Damit ergibt sich bei der Messung über die Windrichtung eine Ungenauigkeit von ca. $\pm 10^\circ$.

Ungenauigkeit der Mikrofone

Die Messmikrofone gehören zu Schallpegelmessern der Klasse 1. Das heißt, der Messfehler liegt unter 0.5 dB. Durch die Kalibrierung der Messmikrofone wurde die Ungenauigkeit möglichst gering gehalten.

5.5. Vergleich der Ergebnisse mit Literaturangaben

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse des Feldexperiments mit den Messergebnissen von einigen bekannten Studien verglichen. Der Vergleich erweist sich als sehr schwierig, da die Messkonstellationen und Ausbreitungsbedingungen sich stark voneinander unterscheiden, siehe Tab. 5.9. Hierin werden nur diejenigen Studien ausgesucht, die verhältnismäßig vergleichbare Bedingungen haben. Im Folgenden werden die einzelnen Merkmale diskutiert.

Als Emission werden in vielen Studien Lautsprecher verwendet. Dies ist in der Hinsicht vorteilhaft, dass die Schallquelle im Gegensatz zu den Schienen- und Straßenverkehrsgläuschen gut zu identifizieren und zu reproduzieren ist. Wenn sich die Emission außerhalb

des Waldes befindet, tritt der sogenannte „Grenzeffekt“ (engl. edge effect) an der Waldgrenze auf, siehe Embleton (1963). Die transmittierte Schallenergie wird am Grenzübergang abgeschwächt, da im Wald eine andere, lokale Atmosphäre herrscht. Dadurch wird die Walddämpfung erhöht. Bei einer Emission aus Schienen- und Straßenverkehr kann der Grenzeffekt vermieden werden, indem das Referenzmikrofon innerhalb des Waldes oder an der Waldgrenze positioniert wird. Dies wurde bei der Konzipierung des Feldexperiments der vorliegenden Arbeit beachtet.

Ein Waldbestand variiert nach Region, Jahreszeit und anderen weiteren Einflüssen. In Hinsicht der Schalldämpfung stellen die Art und Dichte der Bäume zwei der wichtigsten Merkmale eines Waldes dar. Diesbezüglich sind die Angaben in den Studien recht unterschiedlich. Selbst in einem Waldbestand wurden in unterschiedlichen Jahreszeiten abweichende Dämpfungen festgestellt, insbesondere im hohen Frequenzbereich (siehe Price et al. (1988)). Dies ist vermutlich auf die unterschiedliche Belaubung zurückzuführen. Hierbei erkennt man unter anderem die Komplexität beim Vergleich verschiedener Messergebnisse.

Die Dokumentierung über den Boden und die Meteorologie gehört zum Bestandteil einer Messung. Eine genaue Bestimmung der Bodeneigenschaften (Strömungswiderstand, Porosität, Dicke verschiedener Bodenschichten, etc.) ist sehr aufwändig. Deshalb wird in den meisten Studien, bis auf die wenigen Aufnahmen wie z. B. Aylor (1972), die Bodeneigenschaften nur vereinfacht beschrieben. Die Meteorologie erhalten häufig eine untergeordnete Beachtung, da die Einflüsse in einer Ausbreitungsentfernung von 20 m bis 30 m für verhältnismäßig gering gehalten werden. Dementsprechend wird in Tab. 5.9 die Windstärke überschlägig gemäß der Beaufortskala angegeben. In dem Feldexperiment dieser Arbeit wird eine Dämpfung infolge der Gegenwind-Ausbreitung (gegenüber Mitwind) von 20 dB über 200 m ermittelt. Dies zeigt erhebliche Einflüsse des Windes auf offenem Gelände. In einem Waldstück werden diese Einflüsse im geringeren Ausmaß erwartet, da der Kontrast bei Gegen- bzw. Mitwind viel schwächer ausfällt. Es wird dennoch bemerkt, dass die Meteorologie die Ausbreitungsdämpfung auf offenem Gelände beeinflusst, auf welche sich die Zusatzdämpfung bezieht (siehe Gl. (5.5)). Aus diesem Grund muss unbedingt die Meteorologie beim Vergleich verschiedener Messergebnisse berücksichtigt werden.

Die größte Schwierigkeit beim Vergleich der Messergebnisse in Tab. 5.9 besteht jedoch darin, die Angaben der Dämpfung in eine vergleichbare Weise zu interpretieren. Bereits seit Embleton (1963) und Aylor (1972) wurde bekannt, dass die Walddämpfung nicht linear abhängig von der Ausbreitungsentfernung ist. Die Dämpfung in den ersten 50 m von der Waldgrenze in den Wald hinein ist nicht gleich der zwischen dem 50. Meter und dem 100. Meter im Wald. Eine Skalierung der Walddämpfung bezüglich der Ausbreitungsentfernung ist mit Fehler behaftet. Des Weiteren wurde in Fricks Studie die Dämpfung in Bezug auf eine Entfernungsvordoppelung ausgedrückt. In den anderen Studien wurde die Zusatzdämpfung in Bezug auf die Ausbreitungsdämpfung auf offenem Gelände bestimmt. In Embletons Studie errechnete sich jedoch die Zusatzdämpfung aus der Ausbreitungsdämpfung abzüglich der Dämpfung geometrischer Ausbreitung und der Luftabsorption. Das heißt, die indirekten Waldeffekte hinsichtlich des Bodens wurden nicht herausgestellt.

Angaben mit der höchsten Zusatzdämpfung findet man bei Kragh (1979) bzw. bei Fang und Ling (2003). In der vorderen Studie wurde eine Zusatzdämpfung von 5 dB über einen 3 m breiten, extrem dichten Waldstreifen ermittelt; in der letzteren Studie wurde eine Zusatzdämpfung von 9 dB/(20 m) am Bambusbusch festgestellt.

Tab. 5.9: Vergleich der Messergebnisse aus dieser Arbeit und aus verschiedenen, vorherigen Studien. Die Bezeichnung k. A. bedeutet keine (klaren) Angaben in der Studie.

Studie	Emission			Wald		Wind		Zusatzdämpfung
	Typ ^a	Frequenz in Hz	Position ^b	Art ^c	Dichte ^d	Richtung ^e	Stärke ^f	
Embleton (1963)	LS	200 bis 8000	innerhalb	M	k. A.	k. A.	< 3	9 dB/(31 m) ^g
Aylor (1972)	LS	100 bis 10000	innerhalb	N	8.7	k. A.	< 1	7 dB/(31 m) ^{g,h}
Kragh (1979)	Zug	-	Grenze	M	k. A.	G	< 3	(6 bis 7) dB/(25 m) (8 bis 9) dB/(50 m)
Kragh (1981)	Str	-	k. A.	M	k. A.	M	2 bis 3	(0 bis 5) dB/(3 bis 25 m)
Fricke (1984)	Gas	-	innerhalb	N	15	k. A.	k. A.	7 dB/dd ^{g,i}
Pal et al. (2000)	LS	20 bis 20000	außerhalb	L	20 bis 58	k. A.	k. A.	(3 bis 6) dB/(50 m)
Fang und Ling (2003)	LS ^j	63 bis 8000	Grenze	V	8 bis 5000	k. A.	< 2	(1 bis 9) dB/(20 m)
diese Arbeit	Zug	-	Grenze	N	18	M	< 2	13 dB/(100 m)

- ^a Abkürzungen — LS für Lautsprecher, Zug für Zugvorbeifahrten, Str für Straßenverkehrsgeräusche, Gas für Gaskanone
- ^b Position des Referenzmikrofons, bezogen auf den Wald — inner- bzw. außerhalb des Waldes oder an der Waldgrenze
- ^c Art des Waldstücks — L für Laubwald, M für Mischwald, N für Nadelwald, V für verschiedene einzelne Sorten
- ^d Dichte des Waldstücks, Angaben in Anzahl der Bäume in 100 m²
- ^e Windrichtung, bezogen auf die Richtung der Schallausbreitung — M für Mitwind, G für Gegenwind
- ^f Windstärke gemäß der Beaufortskala
- ^g Äquivalenter Pegel, der aus den grafisch, überschlägig bestimmten Pegelwerten in der Studie berechnet wird, da keine Zahlenwerte vorliegen.
- ^h Ausbreitungsdämpfung abzüglich der Dämpfung geometrischer Ausbreitung und der Luftabsorption
- ⁱ Entfernungsverdopplung (engl. doubling of distance)
- ^j aufgenommene Straßenverkehrsgeräusche

6. Berechnung indirekter Waldeffekte am Beispiel des Feldexperiments

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Waldeffekte durch Messdaten belegt, welche sich aus den direkten und indirekten Effekten zusammensetzen. Um diese im Einzelnen zu identifizieren, ist ein Feldexperiment nicht zureichend, da die Messbedingungen nicht beliebig veränderbar sind. Hierzu werden numerische Verfahren benötigt. Die Untersuchung indirekter bzw. direkter Waldeffekte werden jeweils in diesem und dem darauf folgenden Kapitel aufgezeigt.

Wie bereits in Abschnitt 2.1.3 erläutert bestehen die indirekten Waldeffekte aus dem meteorologischen Effekt und dem Bodeneffekt. Das Zusammenwirken dieser beiden Effekte wurde in keiner der dem Autor bisher bekannten Studien erforscht. An dieser Forschungslücke wird die numerische Untersuchung in diesem Kapitel angesetzt. Die hierbei berücksichtigten Effekte sind in Abb. 6.1 skizziert. Die Rechenergebnisse werden mit den Messergebnissen (Kapitel 5) validiert.

In der Untersuchung werden zuerst dreidimensionale Windfelder mit Hilfe des Strömungslösers *FITNAH* berechnet, sowohl für die Messsituationen als auch für weitere Szenarien. Die Topografie des Rechengebiets stammt aus dem digitalen Höhenmodell. Im Waldgebiet wird, gegenüber offenem Gelände, ein höherer Luftwiderstandsbeiwert angenommen, wodurch das Windfeld beeinflusst wird. Auf Basis der Windfelder wird mittels des Akustiklösers *AKU3D* die Schallausbreitung entlang der Messstrecken berechnet. Dies wird in verschiedenen Vertikalschnitten realisiert, da eine dreidimensionale Schallsimulation über die Ausdehnung des Messortes ($300\text{ m} \times 600\text{ m}$) enormer Rechenressourcen bedarf. Als Emission dient eine Punktquelle mit harmonischen Frequenzen (in

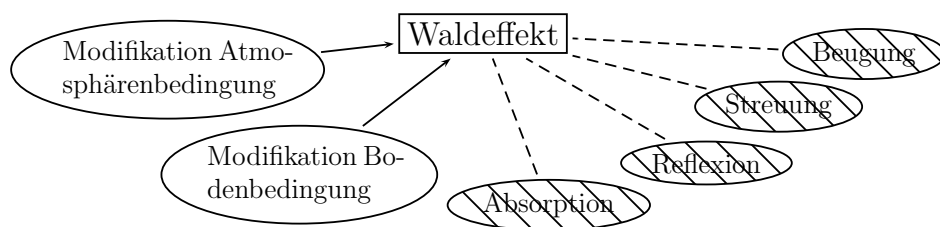


Abb. 6.1.: Skizze über Dämpfungsprozesse der berücksichtigten Waldeffekte. Die nicht miteinbezogenen Effekte sind schraffiert dargestellt.

Terzbändern zwischen 60 Hz und 3 kHz), welche die repräsentative Schallquelle der Zugvorbeifahrten simuliert. Für die Bodeneigenschaften werden Erfahrungswerte aus den vergangenen Studien angenommen. Die Ausbreitungsdämpfungen im Freien, im Wald sowie unter anderen Ausbreitungsbedingungen werden ermittelt und miteinander verglichen. Durch die Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der Parameter von Meteorologie und Boden werden die indirekten Waldeffekte im Einzelnen bestimmt.

In Abschnitt 6.1 wird die Konfiguration der Strömungs- und Schallsimulationen erläutert. Die Rechenergebnisse werden in Abschnitt 6.2 präsentiert und in Abschnitt 6.3 mit den Messergebnissen validiert. Des Weiteren werden die Rechenergebnisse verschiedener Szenarien miteinander verglichen, um die einzelnen Waldeffekte zu quantifizieren. In Abschnitt 6.4 werden mögliche Fehler in den Simulationen diskutiert.

6.1. Konfiguration der Simulationen

Bei der Reproduktion der Ausbreitungsbedingung von Schall wird die Meteorologie in Messperioden I und III vernachlässigt, da die Messgeräte in einem geringen Abstand (10 m) von den Gleisen entfernt sind. Im Gegensatz dazu muss die Meteorologie in Messperioden II und IV berücksichtigt werden. Da sich die Wetterbedingungen zeitlich recht konstant verhalten (Abb. 5.4), wird jeweils ein Windfeld für diese zwei Messperioden simuliert anstatt für jedes einzelne Schallereignis.

Die Berechnung der Schallausbreitung wird auf zwei Vertikalschnitten durchgeführt, einem über die Messstrecken A und C im Norden und dem anderen über die Messstrecken B und D im Süden. Die Vertikalschnitte entsprechen den Strecken $A_F - C_F$ und $B_F - D_F$ in Abb. 5.3.

6.1.1. Simulation der Meteorologie

Zur Simulation der Meteorologie wird das Modell *FITNAH* eingesetzt, welches in Abschnitt 2.3 erläutert wurde. Das Windfeld wird in geographischer Länge und Breite von 1 km um die Messstrecken berechnet. Das Rechengebiet wird horizontal gleichmäßig aufgelöst, $\Delta l_x = \Delta l_y = 10$ m. Die vertikale Maschenweite Δl_z beträgt in Bodennähe 1 m und nimmt mit zunehmender Höhe sukzessiv zu.

Die Randbedingungen — Luftdruck, -temperatur und relative Feuchtigkeit — werden den gemessenen meteorologischen Daten entnommen. Anhand der Beobachtung am Messtag wird eine neutrale Atmosphärenschichtung angenommen. Der vertikale Temperaturgradient beträgt im Modell $\partial\Theta/\partial z = -1$ K/(100 m), mit Θ der potenziellen Lufttemperatur. Die Topografie stammt aus dem erworbenen digitalen Höhenmodell von der Bayerischen Vermessungsverwaltung. Die Landnutzung wird mit Hilfe von Luftbildern bestimmt und unterscheidet sich in dieser Simulation nur zwischen Feld und Wald (siehe Abb. 6.2). Dem Waldgebiet wird anhand der Beobachtung eine Höhe von 15 m zugewiesen. Die spezifische Walddichte im Modell wird in Anlehnung an Groß (1993) auf 0.96

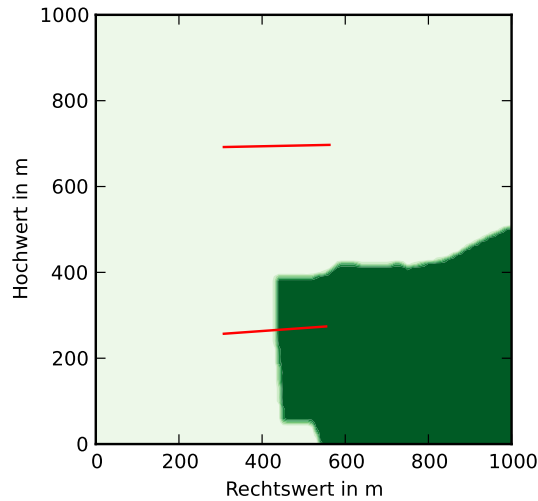


Abb. 6.2.: Landnutzung zur Berechnung der Windfelder, Waldfläche (dunkel grün) und Felder (hell grün) dargestellt, Bezugspunkt an (4414500, 5371250) im Gauß-Krügerschen Koordinatensystem, Angaben in Meter. Vertikalschnitte der Schallsimulation werden durch die roten Striche markiert.

gesetzt. Die berechnete Windrichtung und -geschwindigkeit an den Messpunkten A_N und B_N werden mit den gemessenen Werten verglichen und dienen als Richtwerte. Damit wird das Windfeld mit verschiedenen geostrophischen Winden im Bereich von (1 bis 15) m/s erprobt und so angepasst, bis die beste Übereinstimmung erreicht wird.

Zum Bestimmen eines gemittelten Windfeldes in Messperioden II und IV werden nur die Messdaten während der Schallereignisse berücksichtigt. Die Windrichtung und -geschwindigkeit zum Zeitpunkt einer Zugvorbeifahrt (blaue Markierungen am unteren Rand in Abb. 5.4) werden explizit herausgesucht.

Für die mittlere Windgeschwindigkeit u_m wird der skalare Mittelwert $|\bar{\mathbf{u}}|$ aus den betroffenen Windvektoren \mathbf{u} berechnet

$$u_m = |\bar{\mathbf{u}}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\mathbf{u}_i|. \quad (6.1)$$

Im Gegensatz dazu wird die mittlere Windrichtung ϑ_m aus dem Vektormittel $\bar{\mathbf{u}}$ bestimmt

$$\vartheta_m = \arctan \frac{\bar{u}_x}{\bar{u}_y}, \quad (6.2)$$

mit $\bar{\mathbf{u}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{u}_i$. Die Indizes x und y bezeichnen jeweils die Windkomponente in der Richtung des Rechtswertes bzw. des Hochwertes. Die Sonderfälle der Arkustangens-Funktion bei $\bar{u}_y = 0$ müssen hierbei beachtet werden. Der damit errechnete Winkel bezieht sich auf die y -Achse (Richtung des Hochwertes) und liegt im Uhrzeigersinn zwischen -180° und 180° , mit 0° für Norden. Dieser wird in den Winkelbereich von 0° bis 360° umgerechnet, um vergleichbare Werte mit der gemessenen Windrichtung zu erhalten.

Die Beständigkeit des Windes kann durch das Verhältnis der Geschwindigkeit des Vek-

tormittels zu der des Skalarmittels, $|\bar{\mathbf{u}}|/|\bar{\mathbf{u}}|$, ausgedrückt werden. Dieses besitzt einen Wertebereich von 0 bis 1. Je näher der Wert bei 1 liegt, desto mehr ist die Windrichtung als beständig zu bewerten. In Tab. 6.1 wird die statistische Auswertung der gemessenen Winddaten und die Beständigkeit der Windrichtung zusammengefasst.

6.1.2. Simulation der Akustik

Die Schallausbreitung auf dem Vertikalschnitt wird mittels des FDTD-Modells *AKU3D* berechnet, in welchem ein linearisiertes Eulersches Gleichungssystem gelöst wird. Das zu berechnende Schallfeld umfasst eine Breite von über 250 m und eine Höhe von 33 m. Mit einer gleichmäßigen Maschenweite, $\Delta l_x = \Delta l_z = 0.021$ m, können Frequenzen bis über 3 kHz aufgelöst werden. Der zeitliche Iterationsschritt Δt wird auf $29 \mu\text{s}$ gesetzt, sodass eine stabile Rechnung erfolgt. Die Courant-Friedrichs-Lewy Zahl errechnet sich somit zu

$$\text{CFL} = \frac{c \cdot \Delta t}{\Delta l_x} \approx 0.47. \quad (6.3)$$

Es wird angenommen, dass die dominierende Schallemission einer Zugvorbeifahrt aus den Rad-Schiene-Geräuschen hervorgeht, wie bereits in Seite 72 erläutert, und alle Räder die gleiche Schallleistung abstrahlen. Die Schallquelle in der Simulation wird durch eine Punktquelle am Lotfußpunkt vom Mikrofon zum betrachteten Gleis vereinfacht, da dieser die geringste geometrische Dämpfung aufweist. Die Höhe der Schallquelle beträgt 0.172 m über Grund und entspricht der Höhe der Schienenoberkante von Typ 60E2 gemäß DIN EN 13674-1. Die geometrische Dämpfung einer Punktquelle kann in der zweidimensionalen Rechnung numerisch bedingt nicht implizit realisiert werden. Im Modell erfolgt nachträglich eine Korrektur bezüglich der Quell-Empfänger-Entfernung. Hiermit wird die durch Reflexion und Brechung entstehende Entfernungsabweichung nicht mitberücksichtigt.

Die Schallquelle setzt sich aus harmonischen Schwingungen in Terzbändern zwischen 60 Hz und 3500 Hz zusammen, wobei die Mittenfrequenzen der Terzbänder (siehe

Tab. 6.1.: Statistische Auswertung der gemessenen Winddaten, zum Zeitpunkt der Schallereignisse in Messperioden II und IV: $|\bar{\mathbf{u}}|$ — mittlere Windgeschwindigkeit; $sd(|\mathbf{u}|)$ — Standardabweichung der Windgeschwindigkeit; $|\bar{\mathbf{u}}|$ — Vektormittel der Windvektoren; ϑ_m — mittlere Windrichtung; $|\bar{\mathbf{u}}|/|\bar{\mathbf{u}}|$ — Beständigkeit des Windes.

	Messperiode II		Messperiode IV	
	Messstrecke A	Messstrecke B	Messstrecke C	Messstrecke D
$ \bar{\mathbf{u}} $ in m/s	3.21	2.03	3.01	1.69
$sd(\mathbf{u})$ in m/s	0.31	0.36	0.31	0.19
$ \bar{\mathbf{u}} $ in m/s	3.19	2.00	2.99	1.66
ϑ_m in Grad	238	229	243	237
$ \bar{\mathbf{u}} / \bar{\mathbf{u}} $	0.99	0.98	0.99	0.98

DIN EN ISO 266) wie folgt gerundet werden $f = (63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150)$ Hz. Da lediglich die Pegeldifferenz zwischen Mess- und Referenzmikrofonen von Interesse ist, spielt die Quellstärke keine Rolle für das Rechenergebnis. Wenn man das Spektrum der Tonaufnahmen am Messtag berücksichtigt, siehe das Beispiel in Abb. 5.6, stellt man fest, dass die Geräusche einer Zugvorbeifahrt größtenteils aus den Frequenzen tiefer als 3 kHz bestehen. Dieser Bereich wird mit den verwendeten Terzbändern in der Simulation gut abgedeckt.

Die meteorologischen Daten für die Schallsimulation werden aus dem berechneten Windfeld interpoliert. An den oberen, westlichen und östlichen Rändern des Rechengebietes gilt die reflexionsfreie Bedingung nach Bérenger (1994). Der untere Rand ist durch das digitale Höhenmodell gegeben. Die Bodeneigenschaften werden gemäß der Landnutzung als Feld und Wald charakterisiert. Zur Berechnung der Bodenreflexion wird das Schema nach Heutschi et al. (2005) verwendet. Der spezifische Strömungswiderstand σ wird nach Abschätzung am Messort jeweils auf $200 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ für das Feld und $50 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ für den Wald gesetzt. Diese Werte gehen aus Embleton et al. (1983) hervor, siehe den Auszug in Tab. 5.5.

Mit Blick auf die Simulationsdauer müssen sowohl die Ausbreitungszeit von der Quelle bis zum Fernfeld-Mikrofon als auch die notwendige Zeit zum Bestimmen der tiefsten Frequenzen berücksichtigt werden. Für das zweite Kriterium beachtet man neben der Periode der tiefsten Frequenz die Schwebungsperiode, welche durch die tiefsten zwei Frequenzen f_1 und f_2 bedingt ist

$$\text{Schwebungsperiode} = \frac{1}{|f_1 - f_2|} = \frac{1}{|63 \text{ Hz} - 80 \text{ Hz}|} \approx 0.059 \text{ s} . \quad (6.4)$$

In der Simulation wird das Rechengebiet ausreichend lang beschallt, um die tiefsten Frequenzen korrekt zu erfassen. Durch die reflexionsfreie Randbedingung kann trotz langer Laufzeit eine stabile Lösung erzielt werden.

6.2. Rechenergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die Rechenergebnisse präsentiert. Die Messsituation in zwei Perioden wird reproduziert. Im Anschluss daran wird mit den Faktoren von Boden, Meteorologie und Wald experimentiert, um deren akustische Wirkung getrennt zu untersuchen.

6.2.1. Reproduktion der Messsituationen

Die Wind- und Schallfelder in Messperioden II bzw. IV, in denen eine Schallausbreitung über 100 m ermittelt wurde, wird mit numerischen Verfahren reproduziert.

Windfelder

Durch Variation des geostrophischen Windes wird ein Windfeld berechnet, welches die beste Übereinstimmung zu den gemessenen Winddaten bietet. Als Richtwert dienen die gemessene Windrichtung und -geschwindigkeit an den Messpunkten A_N und B_N . Abb. 6.3 zeigt die Horizontalschnitte der berechneten Windfelder in den Messperioden II und IV. Man kann den Waldeinfluss auf den Wind gut erkennen, siehe hierzu Abb. 6.2. Die Windgeschwindigkeit ist im Waldgebiet schwächer als auf offenem Gelände. Dies gilt für die beiden angezeigten Höhen über Grund ($h = 2$ m bzw. 10 m), da der Wald in der Windsimulation eine Höhe von 15 m besitzt. Am Waldgebiet, bei einem relativen Rechtswert größer als 400 m und einem relativen Hochwert kleiner als 400 m, ist eine Umlenkung des anströmenden Windes gegen den Uhrzeigersinn zu beobachten. In 10 m Höhe ist aufgrund geringerer Bodenreibung die Windgeschwindigkeit deutlich höher als in 2 m Höhe. Zwischen den Windfeldern in den Messperioden II und IV kann man keinen großen Unterschied erkennen. Dennoch wurden diese für die anschließenden Schallsimulationen separat behandelt, um die Messbedingungen möglichst genau nachzubilden.

Ferner kann die Plausibilität der berechneten Windfelder auf den Vertikalschnitten der Messstrecken überprüft werden. Hierzu wird das Windfeld auf das akustische Rechengitter interpoliert und der Windvektor auf die Ebene des Vertikalschnittes projiziert. Abb. 6.4 zeigt ein Beispiel des berechneten Windfeldes für die Messperiode IV. Auf der x -Achse ist die Entfernung zu den Gleisen eingetragen, in östlicher Richtung positiv und in westlicher Richtung negativ, und auf der y -Achse ist die horizontale Komponente der Windgeschwindigkeit dargestellt. In den oberen zwei Diagrammen, dem Vertikalschnitt im Norden, kann man die Verteilung des Windes auf offenem, flachem Gelände sehen. In 1.5 m Höhe über Grund, wie die Kreuze kennzeichnen, beträgt die Windgeschwindigkeit 2.5 m/s; in 10 m Höhe über Grund nimmt diese bis 4.2 m/s zu. Der Wind verhält sich an den drei Aufpunkten, über eine Entfernung von 220 m, sehr ähnlich. In den unteren zwei Diagrammen, dem Vertikalschnitt im Süden, ist am Waldgebiet eine Veränderung des Windes zu beobachten. In 1.5 m Höhe über Grund beträgt die Windgeschwindigkeit an B_F 2.4 m/s und an D_F 1.2 m/s. Im Wald liegen keine Messdaten über den Wind vor. Nach Empfindung des Messpersonals dürfte die Windgeschwindigkeit im Wald bei Null liegen, deshalb wird eine Überschätzung der berechneten Windgeschwindigkeit vermutet.

Eine auffällige Anhöhe der Konturlinie wird über den Gleisen in Höhe zwischen 470 m und 480 m bemerkt. Diese ist vermutlich auf die Interpolation des meteorologischen Rechengitters in das Akustische zurückzuführen. Das meteorologische Rechengitter ist in den horizontalen Koordinaten homogen verteilt und in der Vertikalen inhomogen. Die vertikale Maschenweite beträgt in diesem Höhenbereich 2 m. Im Gegensatz dazu besitzt das akustische Rechengitter in x - und z -Koordinaten eine gleichmäßige Maschenweite von 0.021 m. Durch die geländefolgenden Koordinaten des akustischen Modells, Heimann und Karle (2006), werden die interpolierten Daten in Form des Bodenprofils ausgeprägt. Jedoch ist der Einfluss dieser Anhöhe auf die Schallsimulation vernachlässigbar, da sie sich direkt über der Schallquelle befindet und zur Ausbreitung zu den Messpunkten nichts beiträgt.

Analog wird die Plausibilität des berechneten Windfeldes für die Messperiode II überprüft. In Anhang C findet man die graphische Darstellung der berechneten Windfelder.

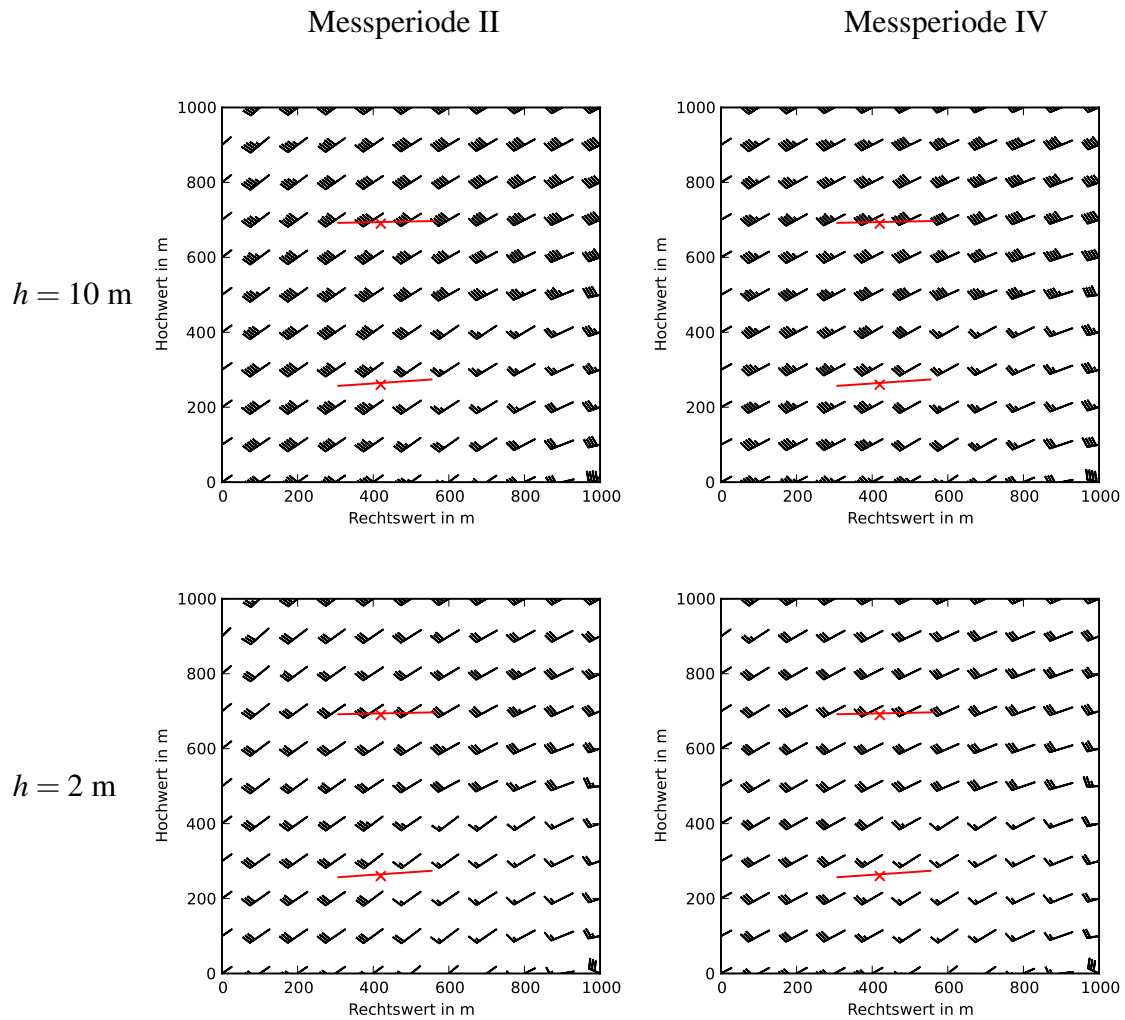


Abb. 6.3.: Berechnete Windfelder im Horizontalschnitt, Bezugspunkt an (4414500, 5371250) im Gauß-Krügerschen Koordinatensystem: oben — 10 m über Grund; unten — 2 m über Grund; links — Messperiode II; rechts — Messperiode IV. Der Fahnenteil mit Signatur zeigt in die Windrichtung, ein halber Strich kennzeichnet eine Windgeschwindigkeit von 0.5 m/s und ein kompletter Strich 1 m/s. Die Messstrecken sind mit rotem Strich markiert und die Messpunkte A_N und B_N mit rotem Kreuz.

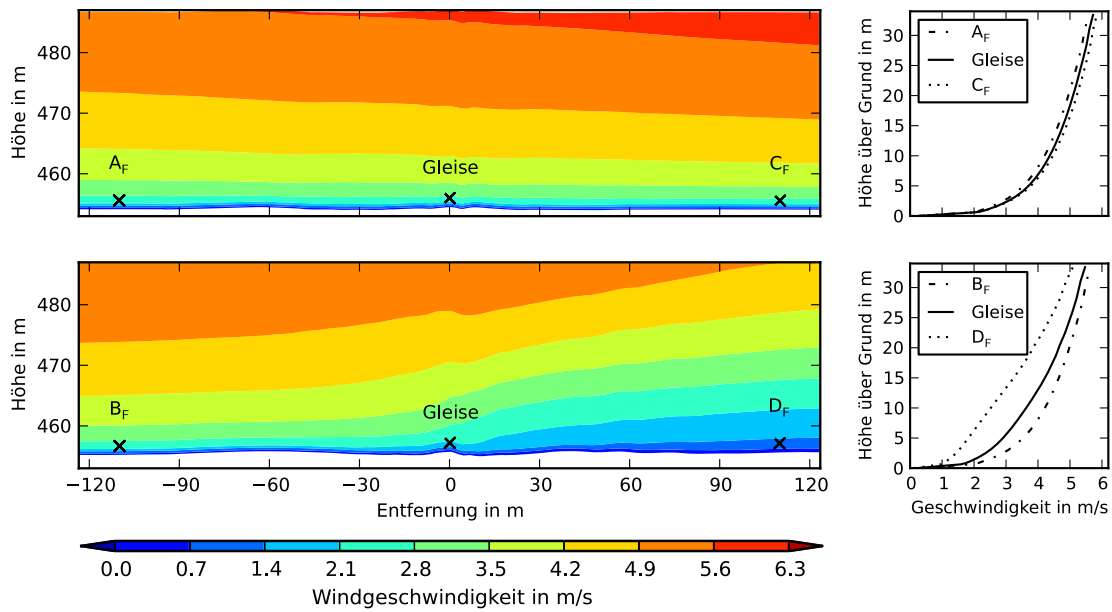


Abb. 6.4.: West-Ost Komponente des berechneten Windfeldes für die Messperiode IV, Windvektor auf die Schallausbreitungsrichtung projiziert, Entfernung auf die Gleise bezogen, Vertikalachse überhöht. Oben — Vertikalschnitt im Norden; unten — Vertikalschnitt im Süden; links — Verteilung der Windgeschwindigkeit in Vertikalschnitt, Angaben gemäß der Farbskala in m/s; rechts — vertikales Windprofil an den Aufpunkten.

Die berechneten Winddaten werden mit den Messdaten an A_N und B_N verglichen und sind in Tab. 6.2 gegenübergestellt. Bei der Windrichtung wird eine sehr gute Übereinstimmung, mit einer Abweichung von 1° , zwischen der Messung und Simulation erreicht. Die berechneten Windgeschwindigkeiten auf offenem Gelände, in den Messstrecken A und C, liegen nah an den Messwerten mit einer Abweichung von 3 %. Die Windgeschwindigkeit an der Waldgrenze ist in der Simulation deutlich höher als in der Messung. Die Abweichung beträgt 35 % in der Messstrecke B und 47 % in der Messstrecke D. In den empirischen Experimenten konnte man keine besser annähernden Werte finden, ohne dabei das Ergebnis an A_N zu verschlechtern. Für die folgende Schallsimulation werden die o. g. Windfelder verwendet.

Tab. 6.2.: Vergleich der gemessenen und berechneten Winddaten in den Messperioden II und IV

		Messperiode II		Messperiode IV	
		A_N	B_N	A_N	B_N
Messung	u_m in m/s	3.2	2.0	3.0	1.7
	ϑ_m in Grad	238	229	243	237
Rechnung	u_m in m/s	3.1	2.7	3.0	2.5
	ϑ_m in Grad	237	230	244	236

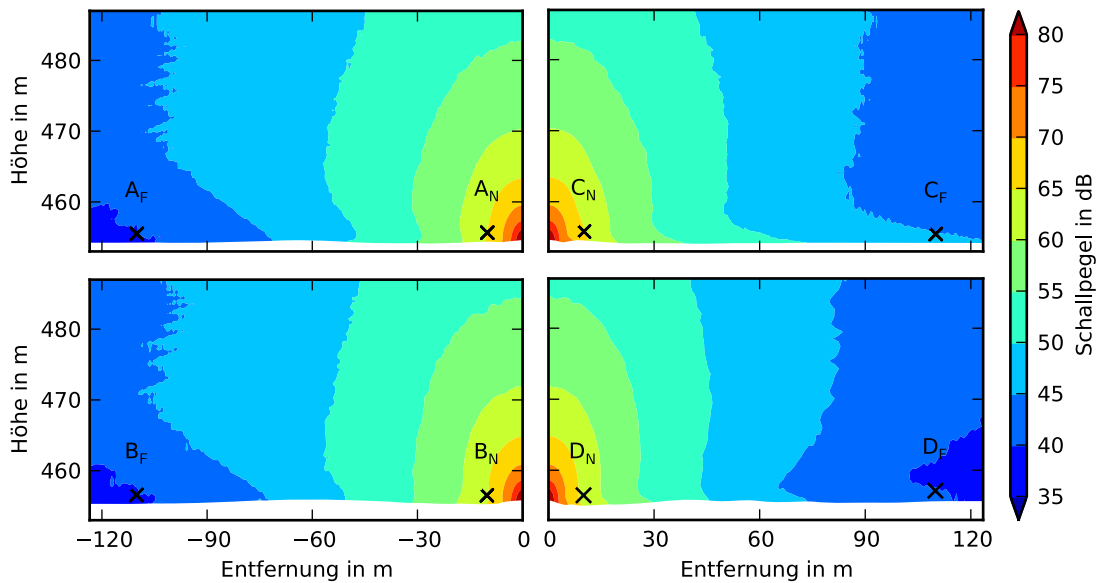


Abb. 6.5.: Verteilung des berechneten Schallpegels im Vertikalschnitt, berechnet unter den Messbedingungen, Entfernung auf die Gleise bezogen, Vertikalachse überhöht, unbewerteter Schallpegel gemäß der Farbskala in dB dargestellt. Das Bodenprofil wird in Weiß abgebildet. Die Kreuze markieren die Position der Messpunkte. Links oben — Messstrecke A; links unten — Messstrecke B; rechts oben — Messstrecke C; rechts unten — Messstrecke D.

Schallfelder

Fortsetzend wird auf Basis der berechneten Windfelder die Schallausbreitung simuliert. Wie bereits erwähnt wurde zwischen den Messperioden II (Messstrecken A und B) und IV (Messstrecken C und D) unterschieden. Die Schallwellen aus einer gegebenen Quelle breiten sich bis zu den Messpunkten A_F , B_F , C_F und D_F aus, siehe Abb. 6.5. In Bodennähe sieht man einen höheren Schalldruck auf der rechten Seite (Osten) der Gleise als in der gleichen Entfernung auf der linken Seite (Westen). Grund dafür ist der durch den Westwind verursachte Brechungseffekt. Dieser geschieht aufwärts bei Gegenwind und abwärts bei Mitwind. Die abwärts gebrochenen Schallwellen werden am Boden reflektiert und in einer gewissen Höhe vermutlich wieder in Richtung des Bodens gebrochen. Somit kann der Brechungseffekt mehrfach stattfinden. Diesen kann man im Diagramm der Messstrecke C bei einer Entfernung von über 50 m ansehen. Durch den Wald wird der Wind verlangsamt, siehe Abb. 6.4. Hierdurch wird die Abwärtsbrechung verstärkt. Jedoch liegt im Waldgebiet eine schallweichere Bodeneigenschaft vor, deshalb ist die Bodenreflexion im Vergleich zu außerhalb des Waldgebiets schwächer. Unter den beiden Messstrecken in einer Mitwind-Situation breitet sich der Schall somit auf offenem Gelände (C) günstiger aus als im Waldgebiet (D).

Dämpfung durch Luftabsorption

Es ist zu beachten, dass in der gezeigten Verteilung von Schalldruck die Dämpfung durch Luftabsorption nicht mitberücksichtigt wurde, da die dafür maßgebende Schallfrequenz in der Modellrechnung (im Zeitbereich) nicht explizit vorhanden ist. Dies ist in der

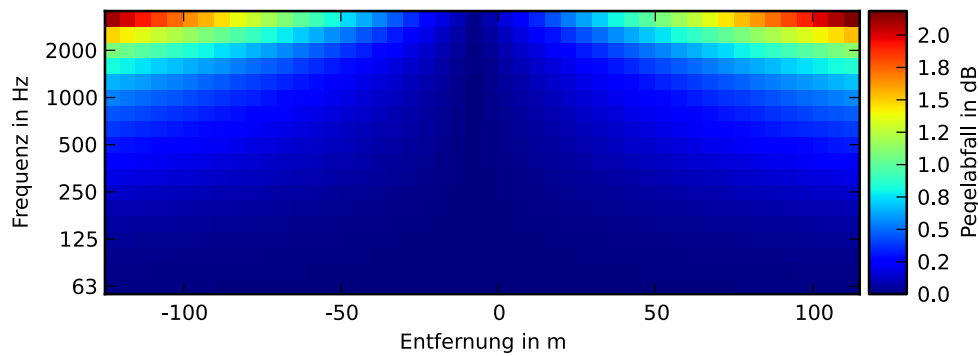


Abb. 6.6.: Berechnete Dämpfung durch Luftabsorption A_{Luft} in Abhängigkeit von der Frequenz und Entfernung, Entfernung auf den Emissionsort bezogen, Dämpfung gemäß der Farbskala in dB dargestellt.

Nachbearbeitung zu ermitteln, indem die Dämpfungskoeffizienten in diskreten Frequenzen berechnet werden. Die Einflussgrößen (Luftfeuchtigkeit, -temperatur und -druck) leiten sich aus den gemittelten Messdaten von A_N und B_N ab. Die Abb. 6.6 zeigt die Dämpfung durch Luftabsorption in Abhängigkeit von der Frequenz und Entfernung, siehe im Vergleich dazu Tab. 5.4. Diese ist auf der linken und rechten Hälfte identisch, da sie nicht vom Wind und Boden am Messort abhängig ist. Bei der höchsten Frequenz $f = 3150$ Hz beträgt die Dämpfung 2.0 dB in 100 m und bei der Tiefsten $f = 63$ Hz lediglich 0.01 dB in 100 m. In Anbetracht der verwendeten Quelle, die eine gleichmäßige Amplitude im Frequenzbereich $f = (60 \text{ bis } 3500)$ Hz besitzt, beträgt die äquivalente Luftdämpfung ca. 2 dB in 100 m (siehe die Erläuterung auf Seite 67).

A-Bewertung

Um die Rechenergebnisse mit den Messergebnissen vergleichen zu können, muss die frequenzabhängige A-Bewertung in Betracht gezogen werden. Die zeitliche Druckschwankung wird mit Hilfe von FFT in den Frequenzbereich umgerechnet. Als Beispiel zeigt Abb. 6.7 die Frequenzinformation an den Messpunkten A_F und A_N . Die diskreten Frequenzen der harmonischen Quelle können deutlich wiedergegeben werden. Ihre Amplitude sinkt mit zunehmender Entfernung. Trotz des geringen Ausbreitungsweges von 10 m zeigt sich an A_N ein andersartiges Spektrum als an der Quelle angeregt. Ursache dafür sind die Interferenzen durch Bodenreflexion. An A_F ändert sich das Spektrum weitgehend. Hierbei spielen neben der Bodenreflexion der Brechungseffekt eine Rolle, welcher ebenfalls frequenzabhängig ist.

Wenn nun die Dämpfung durch Luftabsorption und die Zuschläge der A-Bewertung mitberücksichtigt werden, können das unbewertete sowie A-bewertete Spektrum an den Fernfeld- und Nahfeld-Mikrofonen festgestellt werden, siehe Abb. 6.8. Die blauen, gestrichelten Kurven kennzeichnen den unbewerteten Schallpegel und die roten, gepunkteten Kurven den A-bewerteten Schallpegel. Der äquivalente Schallpegel über das ganze Spektrum wird jeweils durch gestrichelte (unbewertet, L_{eq}) und gepunktete Linien (A-bewertet, $L_{eq,A}$) markiert. In Quellnähe, an A_N , B_N , C_N und D_N , kann man ein ähnliches Spektrum beobachten. Im Gegensatz dazu unterscheiden sich die Spektren in der Ferne, an A_F , B_F , C_F und D_F . In der Gegenwind-Situation liegt der niedrigste

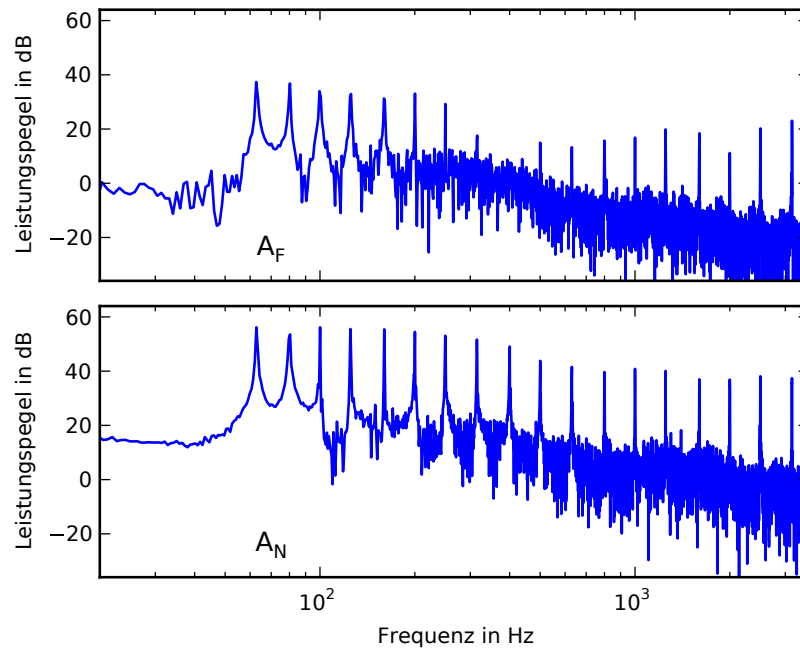


Abb. 6.7.: Berechnete Schalleistungsspektren an Messpunkten A_F (oben) und A_N (unten)

Schallpegel an A_F bei $f = 800$ Hz bzw. 2500 Hz und an B_F bei 1000 Hz bzw. 2500 Hz. In der Mitwind-Situation liegt der niedrigste Schallpegel auf offenem Gelände (C_F) bei 500 Hz bzw. 2000 Hz sowie im Waldgebiet (D_F) bei 250 Hz bzw. 400 Hz.

Anhand der Abb. 6.8 wird die Ausbreitungsdämpfung in den Messstrecken, aus $\Delta L = L_{Nah} - L_{Fern}$, berechnet und in Abb. 6.9 dargestellt. Unter den Messstrecken auf offenem Gelände ist die Dämpfung bei A und B höher gegenüber C und der Unterschied dieser nimmt mit zunehmender Frequenz zu. Dies ist auf die Windeinflüsse zurückzuführen. Die Messstrecken C und D unterscheiden sich im Modell durch das Windfeld und die Bodenbedingung. Die Wirkung dieser Einflüsse führt im Frequenzbereich $f = (125 \text{ bis } 1000) \text{ Hz}$ zu einer höheren Dämpfung bei D als bei C. Jedoch bei $f = 2 \text{ kHz}$ ist die Dämpfung bei D niedriger als bei C.

Die äquivalente Ausbreitungsdämpfung in den einzelnen Messstrecken errechnet sich aus dem über die Frequenzen gemittelten Dämpfungspegel, siehe Tab. 6.3. Eine ähnliche Dämpfung von 30 dB ergibt sich in der Gegenwind-Situation in den Messstrecken A und B. Ebenfalls auf offenem Gelände wird in der Mitwind-Situation (Messstrecke C) eine Dämpfung von 22 dB festgestellt. Im Gegensatz dazu liegt die Dämpfung in der Mitwind-Situation im Waldgebiet (Messstrecke D) bei 23 dB .

Spektralanalyse

Ferner interessiert man sich für die Entwicklung des Schallspektrums während der Ausbreitung. Aufgrund des Westwindes wird ein Brechungseffekt erwartet, welcher mit zunehmender Frequenz stärker wird. Um dies zu überprüfen, wurden entlang des Ausbreitungsweges Aufpunkte in 1.5 m Höhe über Grund positioniert, an denen die Druckschwankung registriert wurde. Die Spektralanalyse dieser Daten, siehe Abb. 6.10, stellt ein asymmetrisches Muster in Bezug zu den Gleisen dar. In der Gegenwind-Situation

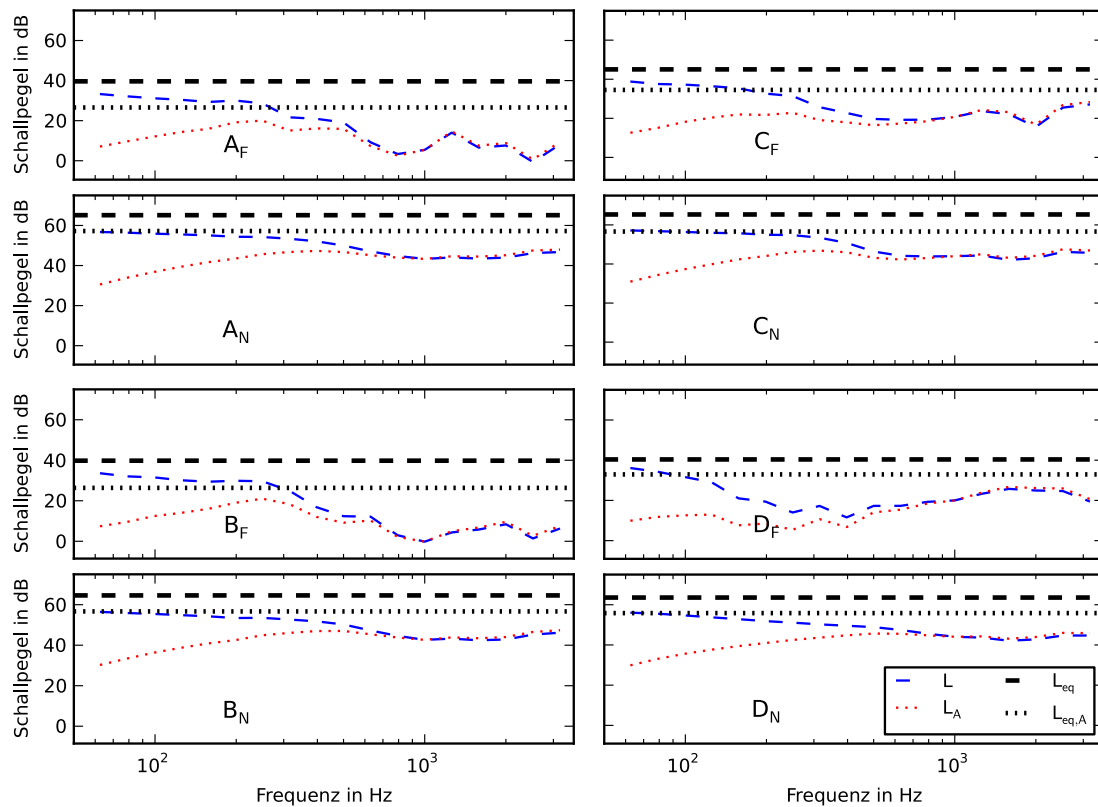


Abb. 6.8.: Berechnete Schalldruckspektren an den einzelnen Messpunkten. Die blauen, gestrichelten Kurven kennzeichnen den unbewerteten Schallpegel und die roten, gepunkteten Kurven den A-bewerteten Schallpegel. Die schwarzen, gestrichelten Linien geben den unbewerteten, äquivalenten Schallpegel L_{eq} über das ganze Spektrum an und die schwarzen, gepunkteten Linien den A-bewerteten, äquivalenten Schallpegel $L_{eq,A}$

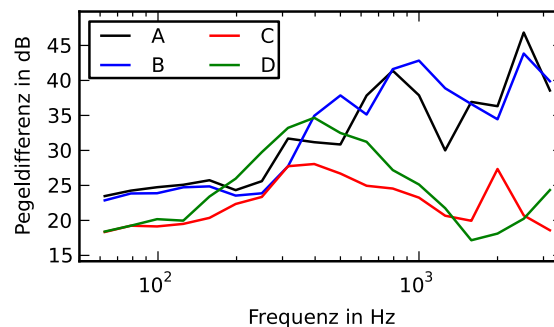


Abb. 6.9.: Spektrum der berechneten Ausbreitungsdämpfung ΔL in den einzelnen Messstrecken. Die Dämpfung errechnet sich aus der Pegeldifferenz $\Delta L = L_{Nah} - L_{Fern}$.

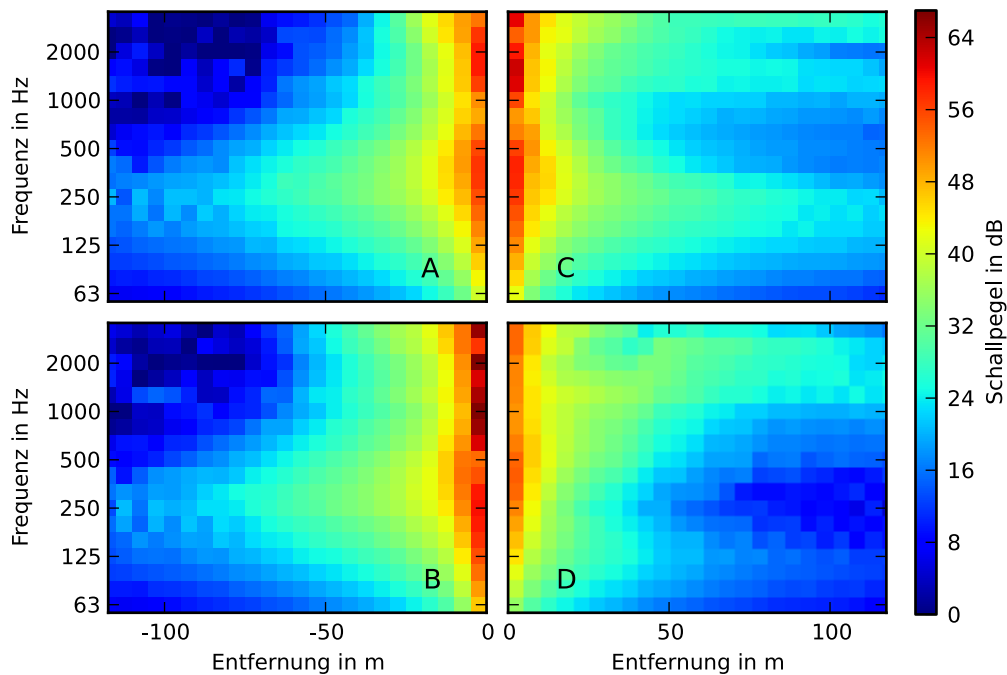


Abb. 6.10.: Berechnete Schallspektren unter Messbedingungen in 1.5 m Höhe über Grund entlang einzelner Messstrecken, A-bewerteter Schallpegel gemäß der Farbskala in dB

(Messstrecke A) werden die hohen Frequenzen $f > 500$ Hz stärker gedämpft als in der Mitwind-Situation (Messstrecke C). Bei einer Frequenz von 2 kHz z. B. ist der Schallpegel nach 50 m Entfernung in der Mitwind-Situation um 10 dB höher als in der Gegenwind-Situation. Die Aufwärtsbrechung bei Gegenwind führt zu einer Pegelabschwächung in Bodennähe und die Abwärtsbrechung bei Mitwind zu einer Pegelverstärkung. Der maximale Schallpegel liegt in der Gegenwind-Situation bei 250 Hz und in der Mitwind-Situation bei 200 Hz, 1250 Hz bzw. über 3 kHz (vergleiche dazu Abb. 6.8). In der Messstrecke B wird ein ähnliches Spektrum wie in der Messstrecke A festgestellt. Der Brechungseffekt ist in B schwächer als in A, da der Gegenwind geringer ist, vergleiche dazu Tab. 6.2. In der Messstrecke D (Waldgebiet) liegt ein ähnliches Spektrum vor wie in der Messstrecke C. Zwischen diesen gibt es in den ersten 50 m kaum einen Unterschied. Über diese Entfernung hinaus werden die Frequenzen zwischen 125 Hz und 1 kHz in D stärker gedämpft als in C.

Tab. 6.3.: Berechnete Ausbreitungsdämpfung ΔL unter den Messbedingungen einzelner Messstrecken, Angaben in A-bewertetem Schallpegel in dB

		Gegenwind		Mitwind	
	Messstrecke	ΔL	Messstrecke	ΔL	
Norden	A*	30.6	C*	22.1	
Süden	B*	30.3	D**	22.9	

* im Freien ** im Wald

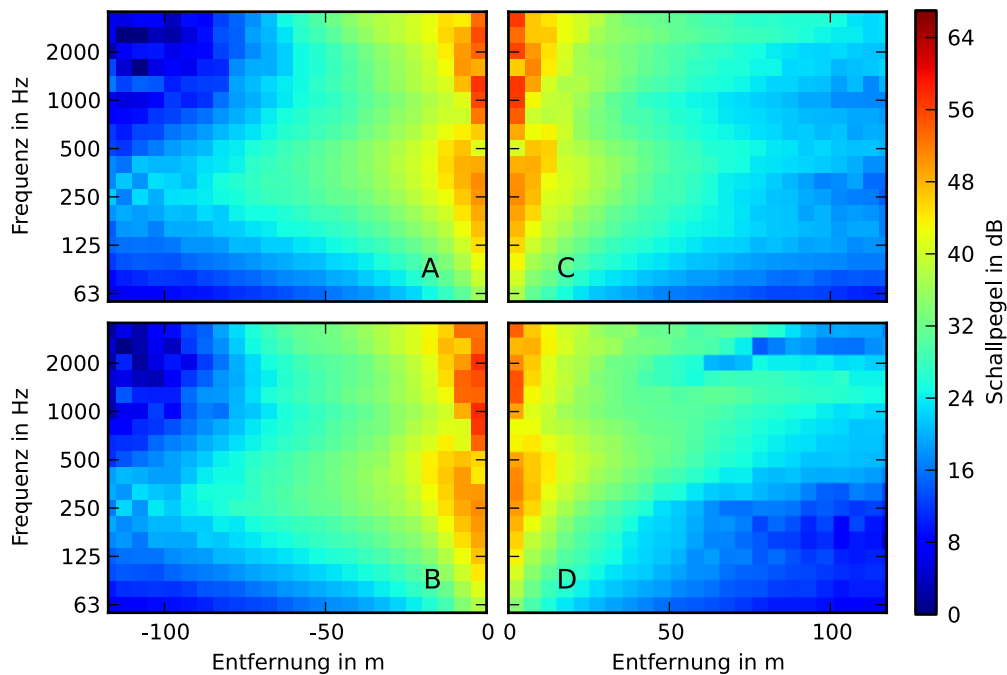


Abb. 6.11.: Berechnete Schallspektren unter Messbedingungen in 4 m Höhe über Grund entlang einzelner Messstrecken, A-bewerteter Schallpegel gemäß der Farbskala in dB

Analog wird die Spektralanalyse in 4 m Höhe durchgeführt, siehe Abb. 6.11. Diese Höhe entspricht der des ersten Geschosses einer Wohnung. Die oben besprochenen Verhältnisse zwischen den Messstrecken bleiben erhalten. In dieser Höhe (4 m) wird eine kleinere Schattenzone gegenüber der niedrigeren Höhe (1.5 m) beobachtet. Der maximale Schallpegel liegt in der Gegenwind-Situation (Messstrecken A und B) nach wie vor bei 250 Hz. In der Mitwind-Situation (Messstrecken C und D) ist in 4 m Höhe der Brechungseffekt stärker als in 1.5 m Höhe. Das Maximum des Schallpegels zeigt sich auf offenem Gelände (C) im Frequenzbereich von über 2 kHz und im Waldgebiet (D) zwischen 1 kHz und 2 kHz.

Zusammenfassung der numerischen Reproduktion

In den vorgestellten Modellrechnungen wurden mit Berücksichtigung der Atmosphäre und des Bodens die Messsituationen reproduziert. Die berechneten Windfelder gaben im Vergleich zu den Messdaten eine gut übereinstimmende Windrichtung wieder. Die berechnete Windgeschwindigkeit lag auf offenem Gelände nahe an der Gemessenen; vor dem Waldgebiet war diese deutlich höher als die Gemessene. Hinsichtlich der vertikalen Windprofile wurden die berechneten Windfelder als plausibel bewertet.

Die Schallsimulation wurde aufgrund der großen Ausdehnung des Gebiets zweidimensional durchgeführt. In der Simulation unterscheidet sich das Waldgebiet von offenem Gelände durch das angestaute Windfeld und den schallweichereren Boden. Da keine Baumsubstanz abgebildet wurde, wurde der direkte Waldeffekt nicht berücksichtigt.

Die Rechenergebnisse (in Tab. 6.3) konnten den Windeinfluss auf die Dämpfung qualitativ korrekt wiedergeben. Die Dämpfung wurde jedoch in der Gegenwind-Situation (A und B) unterschätzt und in der Mitwind-Situation (C) überschätzt. Im Waldgebiet (D) wurden nur die indirekten Effekte berücksichtigt. Einerseits verstärkte das angestaute Windfeld die Abwärtsbrechung und andererseits schwächte der schallweichere Boden die Reflexion ab. Diese zwei Gegebenheiten führten in der Summe zu einer um ca. 1 dB höheren Dämpfung im Vergleich zur Referenz (C).

In den Modellrechnungen wurden die gesamten Effekte von Wind und Boden sowie die indirekten Effekte von Wald behandelt. Um die Einzelwirkungen dieser Effekte zu differenzieren, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Ferner könnte man hieraus eine besser zutreffende Konfiguration des Modells ableiten.

6.2.2. Schalluntersuchung hinsichtlich des Bodens

Der Boden beeinflusst die Schallausbreitung durch die reflektierende bzw. absorbierende Eigenschaft sowie auch durch die Topografie. Da das Gelände der Messstrecken einen Höhenunterschied von lediglich 1 m aufweist, kann in diesem Fall der Einfluss der Topografie vernachlässigt werden. Im Folgenden wird der Einfluss der Bodeneigenschaft untersucht.

Totalabsorbierender Boden

In den berechneten Messsituationen wurde von gut absorbierenden Böden ausgegangen. Interferenzen der Bodenreflexion wurden festgestellt, wodurch eine Wechselwirkung mit dem Windeffekt entstehen konnte. Wird nun eine totalabsorbierende Bodenbedingung angenommen, als würde sich der Schall im Freifeld ausbreiten, so kann man den Windeffekt einzeln studieren. Hierbei werden die berechneten Windfelder (siehe Abb. 6.3) beibehalten. Die Schallspektren während der Ausbreitung sind in Abb. 6.12 dargestellt. Im Vergleich zu Abb. 6.10 liegt eine größere Schattenzone in Gegenwind vor. Der Brechungseffekt ist wie erwartet im hohen Frequenzbereich stärker als im Tiefen. Es ist zu erkennen, dass die weitläufige Ausbreitung bei $f = 250$ Hz in Abb. 6.10 auf die Bodenreflexion zurückzuführen ist. Die Ausbreitungsdämpfung über die gegebenen Aufpunkte ist in Tab. 6.4 aufgelistet. Sie ist in der Gegenwind-Situation um 20 dB höher als in der Mitwind-Situation. Dieser Betrag ist gleich der Differenz zwischen den gemessenen Dämpfungen in den Strecken A und C. In der Mitwind-Situation zeigt sich eine beinahe identische Ausbreitungsdämpfung. Dies lässt schlussfolgern, dass die durch den Wald modifizierte Brechung kaum zur Dämpfung beiträgt, wenn die Mitwirkung von Boden ausgeschlossen wird.

6.2.3. Schalluntersuchung hinsichtlich der Meteorologie

Der Brechungseffekt ist durch die Verteilung der effektiven Schallgeschwindigkeit bedingt, welche wiederum stark von der Schichtung der Atmosphäre abhängt. Auf die

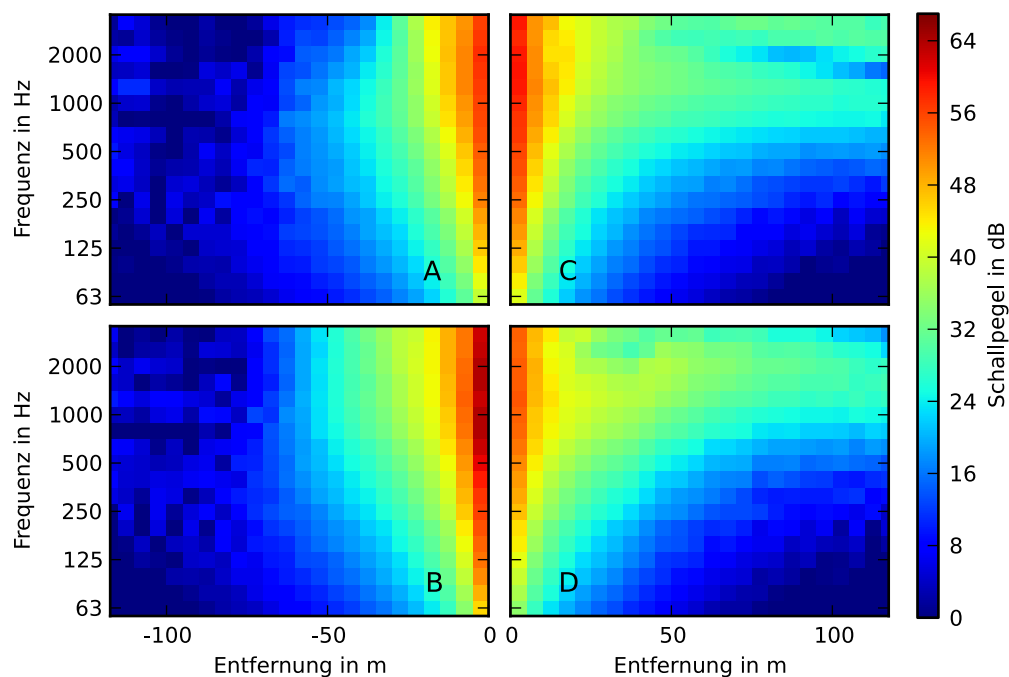


Abb. 6.12.: Berechnete Schallspektren auf totalabsorbierendem Boden in 1.5 m Höhe über Grund entlang einzelner Messstrecken, A-bewerteter Schallpegel gemäß der Farbskala in dB

Tab. 6.4.: Berechnete Ausbreitungsdämpfung ΔL auf totalabsorbierendem Boden in den einzelnen Messstrecken, Angaben in A-bewertetem Schallpegel in dB

	Gegenwind		Mitwind	
	Messstrecke	ΔL	Messstrecke	ΔL
Norden	A*	39.9	C*	20.3
Süden	B*	40.6	D**	20.5

* im Freien ** im Wald

Schichtung kann man im Modell durch eine Veränderung am Temperaturgradienten sowie am Windfeld Einfluss nehmen. Im Folgenden werden Experimente mit diesen Variationen vorgestellt. Weiter wird im Modell, im Gegensatz zur vorhergehenden Reproduktion der Messsituationen, eine homogene Atmosphäre angenommen, um die meteorologischen Einflüsse auf die Schallausbreitung herauszufinden.

Atmosphärensichtung

Bisher wurde in den Messsituationen eine neutrale Schichtung der Atmosphäre angenommen. Im Falle einer labileren Schichtung wurden die Windfelder, im Vergleich zur neutralen Bedingung in der vorgestellten Modellrechnung, mit einem geringeren Temperaturgradienten ($\partial\Theta/\partial z = -1.35 \text{ K}/(100 \text{ m})$) erneut simuliert. Als Richtwerte gelten nach wie vor die Messdaten von A_N und B_N . Die mit dieser labilen Schichtung durchgeführte Schallsimulation weist ein sehr ähnliches Spektrum wie in der neutralen Schichtung auf. Die Diagramme werden in Anhang C Abb. C.4 gezeigt.

Auf die gleiche Weise wurde das Experiment mit einer stabileren Schichtung, $\partial\Theta/\partial z = -0.65 \text{ K}/(100 \text{ m})$, wiederholt. Die berechneten Schallspektren werden in Abb. C.5 gezeigt. Die Ausbreitungsdämpfung in der labileren und stabileren Schichtung wird in Tab. 6.5 zusammengefasst. Hierin kann man keinen nennenswerten Unterschied zwischen der labilen und stabilen Bedingung feststellen. Ursache dafür ist die verhältnismäßig geringe Ausbreitungsentfernung, für die lediglich die Brechung in geringer Höhe (ca. ein Zehntel der Entfernung) eine Rolle spielt. Über eine größere Entfernung, über hunderte Meter bis in den Bereich von Kilometern, trägt der Brechungseffekt aus einer größeren Höhe zur Schallausbreitung bei. In diesem Fall nimmt die Bedeutung der Temperaturschichtung zu.

Windgeschwindigkeit

Anhand der gemessenen maximalen und minimalen Windgeschwindigkeit wurden neue Windfelder mit einer höheren bzw. einer niedrigeren Geschwindigkeit berechnet. Die grafische Darstellung der Windfelder ist in Anhang C Abb. C.3 beigelegt. Die Schallspektren

Tab. 6.5.: Berechnete Ausbreitungsdämpfung ΔL in labiler und stabiler Atmosphärensichtung in den einzelnen Messstrecken, Angaben in A-bewertetem Schallpegel in dB

Gegenwind				Mitwind		
	Messstrecke	Schichtung	ΔL	Messstrecke	Schichtung	ΔL
Norden	A*	labil	31.1	C*	labil	22.2
		stabil	31.0		stabil	22.2
Süden	B*	labil	30.2	D**	labil	22.9
		stabil	30.1		stabil	23.4

* im Freien

** im Wald

ähneln sehr den mit gemittelter Windgeschwindigkeit, siehe Anhang C Abb. C.6 und C.7. Die Ausbreitungsdämpfung in den betrachteten Fällen ist in Tab. 6.6 gegenübergestellt. Im Vergleich zur Simulation mit gemittelter Windgeschwindigkeit (Tab. 6.3) nimmt bei stärkerem Wind die Dämpfung im Waldgebiet um 1 dB zu. Auf offenem Gelände wird keine nennenswerte Veränderung an der Dämpfung beobachtet. Im Gegensatz dazu nimmt die Dämpfung bei schwächerem Wind in der Messstrecke B um 1 dB ab und in C um 1 dB zu. Angesichts dieser Experimente kann man eine Abhängigkeit zwischen der Windgeschwindigkeit und der Dämpfung feststellen. Jedoch zeigen diese im gegebenen Variationsrahmen keine signifikante Tendenz.

Homogene Atmosphäre

Ein Extremfall der Schallausbreitung wurde hierbei ohne Einfluss von Meteorologie untersucht. Dabei wurde als Atmosphäre ein vollständig homogenes Medium eingestellt. Die Messstrecken unterscheiden sich lediglich durch die Bodeneigenschaft, auf den Feldern (A, B und C) mit $\sigma = 200 \text{ kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ schallhärter als im Waldgebiet (D) mit $\sigma = 50 \text{ kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$. Die berechneten Schallspektren werden in Abb. 6.13 gezeigt. Zwischen A, B und C wird eine beinahe identische Verteilung festgestellt. Die Ausbreitungsdämpfung liegt zwischen 26.2 dB und 26.7 dB. Im Spektrum D wird bei $f = (125 \text{ bis } 500) \text{ Hz}$ ein geringerer Schallpegel beobachtet, welcher der Bodendämpfung zuzuschreiben ist. Die Ausbreitungsdämpfung beträgt 28.6 dB.

Ferner wurde in der homogenen Atmosphäre die Wirkung des Bodeneffekts untersucht. Im Waldgebiet wurden nun schallhärtere Böden verwendet, mit $\sigma = 200 \text{ kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ bzw. $2000 \text{ kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$, wobei letztere ungefähr einem Kiesboden entspricht, siehe Tab. 5.5. Abb. 6.14 zeigt die berechneten Schallspektren. Mit zunehmender Boden Härte werden die Interferenzen insbesondere bei $f = (125 \text{ bis } 1000) \text{ Hz}$ verstärkt. Die Ausbreitungsdämpfung in den betrachteten Fällen wird in Tab. 6.7 zusammengefasst. Ohne das Mitwirken von Meteorologie führt die Variation der Bodeneigenschaft im gegebenen Rahmen zu einer Dämpfungsveränderung von 8 dB.

Tab. 6.6.: Berechnete Ausbreitungsdämpfung ΔL in stärkerem und schwächerem Windfeld in den einzelnen Messstrecken, Angaben in A-bewertetem Schallpegel in dB

		Gegenwind		Mitwind		
	Messstrecke	$ u $	ΔL	Messstrecke	$ u $	ΔL
Norden	A*	u_{\max}	30.9	C*	u_{\max}	22.0
		u_{\min}	30.7		u_{\min}	23.2
Süden	B*	u_{\max}	30.0	D**	u_{\max}	24.0
		u_{\min}	29.4		u_{\min}	23.5

* im Freien

** im Wald

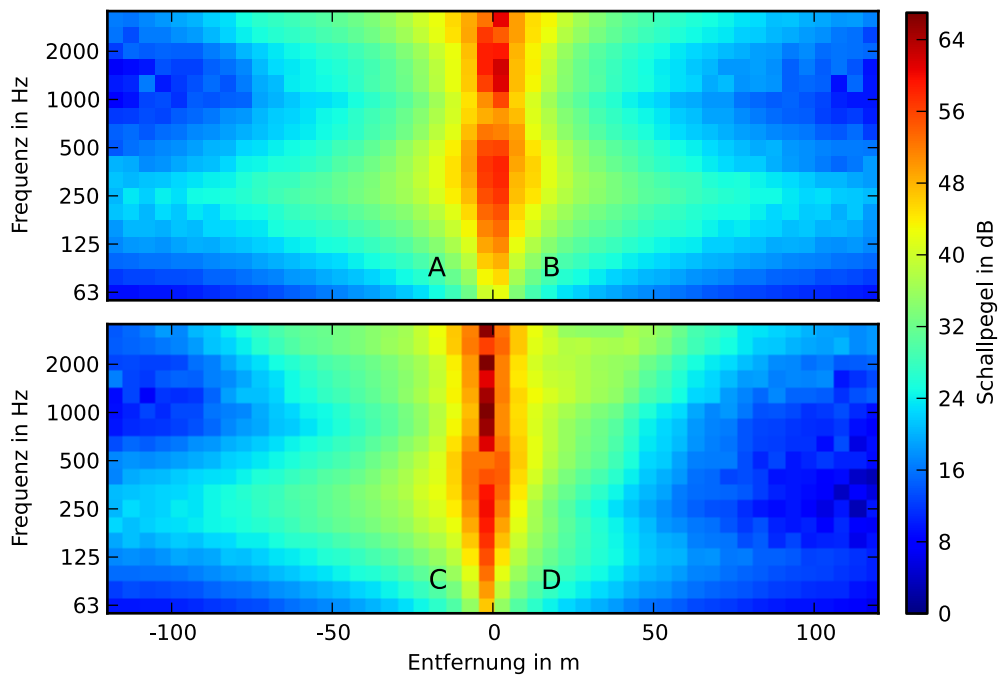


Abb. 6.13.: Berechnete Schallspektren in homogener Atmosphäre in 1.5 m Höhe über Grund entlang einzelner Messstrecken, A-bewerteter Schallpegel gemäß der Farbskala in dB

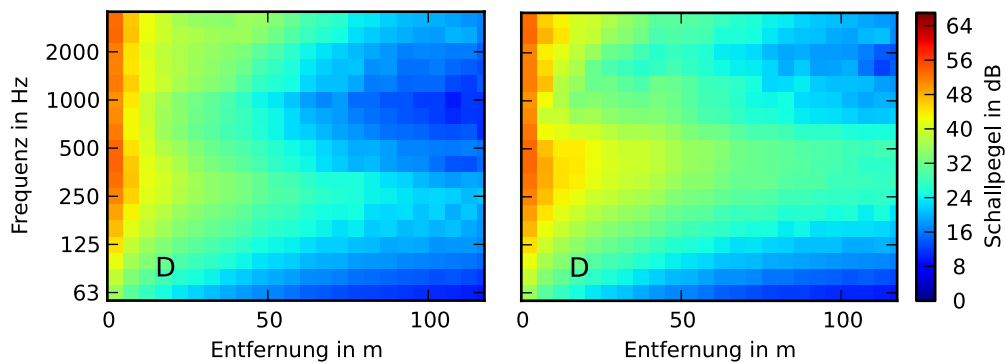


Abb. 6.14.: Berechnete Schallspektren ohne Effekte der Meteorologie in 1.5 m Höhe über Grund entlang Messstrecke D, mit verschiedenen Böden im Waldgebiet, A-bewerteter Schallpegel gemäß der Farbskala in dB. Links — $\sigma = 200 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$, rechts — $\sigma = 2000 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

6.2.4. Schalluntersuchung hinsichtlich des Waldes

Die direkten und indirekten Effekte eines Waldes werden im Folgenden durch Fallbeispiele untersucht. Ausgangspunkt dieser Experimente ist die Simulation der Messsituation D, siehe Seite 85. Als erstes wird im Waldgebiet, in Analogie zum vorangegangenen Abschnitt, mit verschiedenen Bodeneigenschaften experimentiert. Ferner wird im Waldgebiet die Windstille eingesetzt. Der durch den Wald verursachte Brechungseffekt tritt im Extremfall auf. Zum Schluss wird eine vollständige Schallabschirmung im Waldgebiet angenommen, um die maximal mögliche Dämpfung eines Waldes herauszufinden.

Bodeneigenschaft im Waldgebiet

Mit dem beibehaltenen Windfeld wird die Ausbreitung über einem schallhärteren Boden, mit $\sigma = 2000 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$, im Waldgebiet berechnet. Das errechnete Spektrum ist in Abb. 6.15 gezeigt. Hierin findet man im Vergleich zu Abb. 6.10 einen höheren Schallpegel bei $f = 250 \text{ Hz}$, welcher auf die verstärkte Bodenreflexion zurückzuführen ist. Die Ausbreitungsdämpfung beträgt in diesem Fall 18.3 dB und liegt um knapp 5 dB unter der der Ausgangssimulation (mit $\sigma = 50 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$). Das parallele Experiment mit einer homogenen Atmosphäre (Tab. 6.7) ergab mit zunehmender Boden Härte (mit σ von $50 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ bis $2000 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$) eine Dämpfungsminde rung von 8 dB.

Windabschirmung im Waldgebiet

In diesem Versuch wird ebenfalls das Windfeld aus der Simulation der Messsituation D beibehalten. Innerhalb des Waldgebiets wird die Windgeschwindigkeit abrupt auf Null herabgesetzt. Abb. 6.16 (links) und Abb. 6.17 stellen jeweils das errechnete Schallfeld und Spektrum dar. Das letztere zeigt bei $f > 1 \text{ kHz}$ einen deutlich niedrigeren Pegel gegenüber dem Spektrum der Ausgangssimulation (Abb. 6.10). Dies verdeutlicht noch einmal den Einfluss der Windgeschwindigkeit auf den Brechungseffekt. Die Ausbreitungsdämpfung ergibt 28.1 dB. Diese ist im Vergleich zur Ausgangssimulation (Tab. 6.3) um 5 dB höher.

Tab. 6.7.: Berechnete Ausbreitungsdämpfung ΔL in homogener Atmosphäre in den einzelnen Messstrecken, mit verschiedenen Böden im Waldgebiet, Angaben von ΔL in A-bewertetem Schallpegel in dB, Angaben von σ in $\text{kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

		Gegenwind			Mitwind		
	Messstrecke	σ	ΔL	Messstrecke	σ	ΔL	
Norden	A*	200	26.2	C*	200	26.6	
					50	28.6	
Süden	B*	200	27.0	D**	200	25.9	
					2000	20.8	

* im Freien

** im Wald

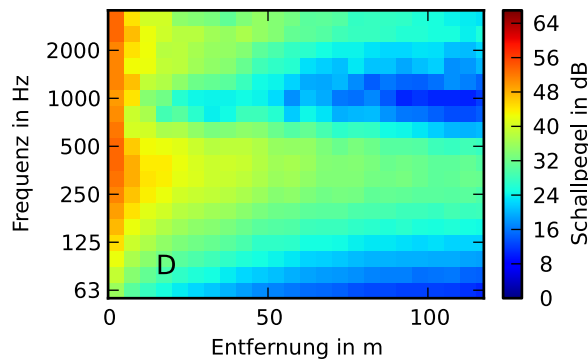


Abb. 6.15.: Berechnetes Schallspektrum in 1.5 m Höhe über Grund entlang der Messstrecke D, mit schallhärterem Boden im Waldgebiet, $\sigma = 2000 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$, A-bewerteter Schallpegel gemäß der Farbskala in dB

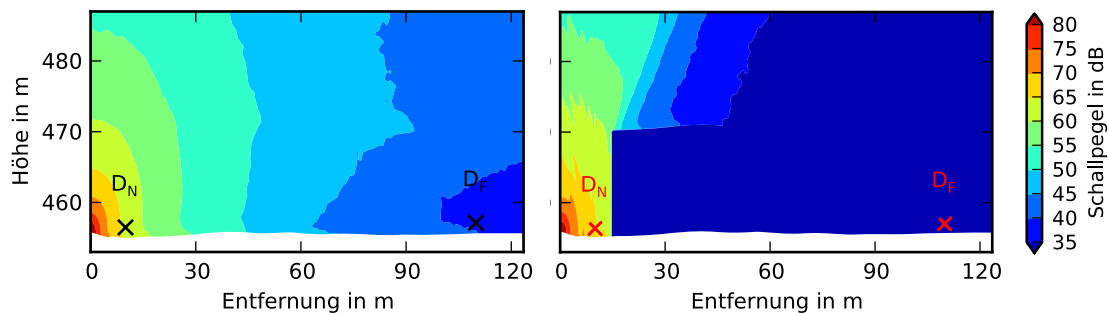


Abb. 6.16.: Verteilung des berechneten Schallpegels im Vertikalschnitt, mit verschiedenen akustischen Bedingungen Waldes, Entfernung auf die Gleise bezogen, unbewerteter Schallpegel gemäß der Farbskala in dB. Das Bodenprofil wird in Weiß abgebildet. Die Kreuze markieren die Position der Messpunkte. Links — mit vollständiger Windabschirmung im Waldgebiet; rechts — mit vollständiger Schallabschirmung im Waldgebiet.

Der Unterschied zum Experiment ohne Berücksichtigung der Meteorologie beträgt 0.5 dB und kann nicht als signifikant bewertet werden.

Schallabschirmung im Waldgebiet

Die maximale Dämpfung eines Waldes kann erreicht werden, wenn dieser keinen Schall durchlässt. Hierfür wird ein Festkörper als Waldgebiet definiert, dessen Ränder den Schall totalreflektieren. Um extreme Interferenzen zu vermeiden, wird dieser Festkörper in einem Abstand von 5 m zu den Aufpunkten D_N und D_F gesetzt. Abb. 6.16 (rechts) zeigt das errechnete Schallfeld. Die Ausbreitungsdämpfung ergibt 64.0 dB.

6.3. Vergleich der Ergebnisse

In den vorgestellten Simulationen wurden die Messsituationen bzgl. Wind- und Schallfeld reproduziert. Die Plausibilität der berechneten Windfelder wurde anhand der Messdaten

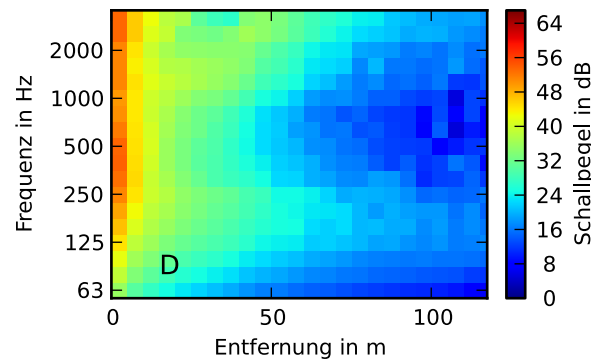


Abb. 6.17.: Berechnetes Schallspektrum in 1.5 m Höhe über Grund entlang der Messstrecke D, mit vollständiger Windabschirmung im Wald, A-bewerteter Schallpegel gemäß der Farbskala in dB

von A_N und B_N überprüft. Die Schallausbreitung wurde in den verschiedenen Messsituationen sowie in modifizierten Situationen durchgeführt. Ein Überblick über die Konfiguration der Messungen und Simulationen wird in Tab. 6.8 gegeben.

Zum Vergleich werden alle vorgestellten Ergebnisse der Messung und Simulationen noch einmal in Tab. 6.9 zusammengefasst. Die Messung wird im Folgenden mit M bezeichnet und die Simulationsreihe mit S_n , wobei $n = 1, 2, \dots, 8$ ist. Die Dämpfung der Messstrecke D wird durch Fettdruck hervorgehoben. Für eine bessere Übersicht werden alle Beträge mathematisch zur nächsten Ganzzahl gerundet. Anhand dieser Tabelle werden in den darauf folgenden Abschnitten die Differenz zwischen den Messungen und den Simulationen sowie die Einflüsse der einzelnen Effekte diskutiert.

6.3.1. Vergleich der Messung und der numerischen Reproduktion

Die Dämpfungen entlang der Messstrecken A und B, ΔL_A und ΔL_B , sind in der Simulation unter Messbedingung (S0) um 5 dB niedriger als in der Messung (M) und die Dämpfung ΔL_C ist in S0 um 6 dB höher als in M. Da sich die Topografie und Bodeneigenschaften in diesen Messstrecken sehr geringfügig unterscheiden, sind die Abweichungen dem Brechungseffekt zuzuordnen. Aus diesem Vergleich kann man schlussfolgern, dass der Brechungseffekt im Modell um 6 dB/(100 m) gegenüber der Messung unterschätzt wurde. Ursachen dafür können eine Unterschätzung am vertikalen Windgeschwindigkeits- bzw.

Tab. 6.8.: Konfiguration der Messungen und Simulationen

	Messung	Simulation
Schallquelle	Zugvorbeifahrten	Diskrete Frequenzen $f = (63 \text{ bis } 3500) \text{ Hz}$
Bodeneigenschaft	Felder / Wald	$\sigma = (50 \text{ bis } 2000) \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
Erfasst	Gesamtdämpfung	Dämpfung indirekter Effekte
Bemerkung	–	2-D Rechnung

Tab. 6.9.: Gemessene und berechnete Ausbreitungsdämpfung ΔL unter den untersuchten Bedingungen, Angaben in A-bewertetem Schallpegel in dB. Die Dämpfung im Waldgebiet wird durch Fettdruck hervorgehoben.

Kennung	Bedingung	Westseite		Ostseite	
		Messstrecke	ΔL	Messstrecke	ΔL
M	Messung	A	36	C	16
		B	35	D	29
S0	Messbedingung	A	31	C	22
		B	30	D	23
S1	Totalabsorbierender Boden	A	40	C	20
		B	41	D	21
S2	Labile Atmosphärensichtung	A	31	C	22
		B	30	D	23
S3	Stabile Atmosphärensichtung	A	30	C	22
		B	30	D	23
S4	Stärkerer Wind	A	31	C	22
		B	30	D	24
S5	Schwächerer Wind	A	31	C	23
		B	29	D	24
S6	Ohne Meteorologie, verschiedene Böden im Wald	A	26	C	27
					29^a
		B	27	D	26^b 21^c
S7	Windabschirmung im Wald	B	30	D	28
S8	Schallabschirmung im Wald	B	28	D	64

^a $\sigma = 50 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

^b $\sigma = 200 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

^c $\sigma = 2000 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

Temperaturgradienten im Strömungsmodell sowie eine Unterschätzung am Brechungseffekt im Akustikmodell sein.

Analog kann man die Differenz der Dämpfung zwischen den Messstrecken C und D bilden, um die Zusatzdämpfung aufgrund des Waldes $\Delta\Delta L_{\text{Wald}}$ zu bestimmen

$$\Delta\Delta L_{\text{Wald}} = \Delta L_D - \Delta L_C . \quad (6.5)$$

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Zusatzdämpfung der Messung die Gesamtwirkung der direkten und indirekten Effekte darstellt, während in der Simulation lediglich die indirekten Effekte berücksichtigt wurden. Die Zusatzdämpfung des Waldes beträgt in der Messung 13 dB/(100 m), in der Simulation 1 dB/(100 m).

6.3.2. Vergleich der Simulationen unter modifizierten Ausbreitungsbedingungen

Um den Einfluss einer bestimmten Testbedingung gegenüber der Referenzbedingung zu ermitteln, wird die Zusatzdämpfung wie folgt definiert

$$\Delta\Delta L_X |_{\text{Testbedingung/Referenzbedingung}} = \Delta L_{\text{Testbedingung}} - \Delta L_{\text{Referenzbedingung}} , \quad (6.6)$$

wobei X die Messstrecken A, B, C und D bezeichnet. Ist diese Größe positiv, wird die Dämpfung durch die Testbedingung im Vergleich zur Referenz erhöht; anderenfalls wird die Dämpfung reduziert.

Bodeneffekt

Der Bodeneffekt wird im Modell festgestellt, indem man die Simulation S1 mit S0 vergleicht. Wie in Tab. 6.10 ersichtlich ist, wird die Dämpfung durch die totale Bodenabsorption bei Gegenwind um bis zu 11 dB/(100 m) erhöht. Dieser große Betrag lässt sich damit erklären, dass der Immissionspegel im Fernfeld, unter der Wirkung der Aufwärtsbrechung, wesentlich durch die Bodenreflexion beeinflusst wird. Sollte diese wegfallen, so sinkt der Immissionspegel verhältnismäßig stark. Dementsprechend ergibt sich eine höhere Dämpfung. Bei Mitwind trägt die Abwärtsbrechung zum Immissionspegel bei. Wird die Bodenreflexion unterdrückt, steigt der Immissionspegel verhältnismäßig wenig. Somit wird die Dämpfung durch die totale Bodenabsorption bei Mitwind lediglich um 2 dB/(100 m) reduziert.

Meteorologische Effekte

Die Modifikation der Atmosphäre hinsichtlich der Temperaturschichtung und Windgeschwindigkeit im Modell veränderte die Dämpfung unerheblich. Die dadurch hervorgerufene Zusatzdämpfung von S2, S3, S4 und S5 im Vergleich zu S0 liegt bei ± 1 dB/(100 m), siehe Tab. 6.10. Das heißt, dass eine nichtzutreffende Schätzung an der Schichtung bzw.

eine schwankende Windgeschwindigkeit die Dämpfung in der Simulation nicht wesentlich beeinflussen würde. Grund dafür ist die geringe Ausbreitungsentfernung von 110 m bis zum Fernfeld-Mikrofon, in welcher die Variation der Meteorologie im gegebenen Rahmen keine deutliche Wirkung zeigt.

Dennoch spielt der meteorologische Effekt eine große Rolle für die betrachteten Ausbreitungssituationen. Denn die Simulation ohne Berücksichtigung der Meteorologie S6 ergibt im Vergleich zu S0 deutlich unterschiedliche Dämpfungen, siehe Tab. 6.11. Die Dämpfung in der homogenen Atmosphäre ist im Vergleich zur Gegenwind-Situation um bis zu 6 dB/(100 m) stärker, im Vergleich zur Mitwind-Situation um 5 dB/(100 m) schwächer.

Waldeffekt

Wie bereits in Gl. (2.28) beschrieben wurde, beeinflusst der Wald die Schallausbreitung auf direkte und indirekte Weise. Dies wird in den Simulationen S6, S7 und S8 modelliert. Die sich dadurch ergebende Zusatzdämpfung im Vergleich zu S0 wird in Tab. 6.12 dargestellt. Ohne Berücksichtigung der Meteorologie nimmt durch zunehmende Boden Härte (σ von $50 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ auf $2000 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$) die Zusatzdämpfung um 8 dB ab. Sollte die Windgeschwindigkeit im Waldgebiet stärker reduziert werden als im Strömungsmodell berechnet, wäre eine Erhöhung der Dämpfung um maximal 5 dB möglich. Im Extremfall mit einer Schallabschirmung des Waldgebiets, in welchem sowohl die direkten als auch die indirekten Effekte vollständig unterdrückt werden, nimmt die Dämpfung um 41 dB zu.

Die Simulation S8 stellt einen Extremfall dar, welcher in der Natur unwahrscheinlich vorkommt, mit einer Dämpfung von 64 dB im Waldgebiet. Zur Dämpfungserhöhung ist eine Situation mit weichem Boden und ohne Abwärtsbrechung besonders günstig. Unter diesen Bedingungen im Waldgebiet wurde in der Simulation S6 eine Dämpfung von 29 dB festgestellt. Im Gegensatz dazu sind für die Schalldämpfung ein schallharter Boden und eine Abwärtsbrechung von Nachteil. Mit dem simulierten Westwind und einer Boden Härte von $\sigma = 2000 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ergibt das Modell eine Dämpfung von 18 dB.

6.4. Fehlerbetrachtung

In den Simulationen wurde die Schallquelle durch harmonische Frequenzen in den Terzbändern $f = (63, 80, \dots, 3150) \text{ Hz}$ mit einer gleichmäßigen Amplitude formuliert. Diese

Tab. 6.10.: Berechnete Zusatzdämpfung $\Delta\Delta L$ aufgrund totaler Bodenabsorption, Angaben in A-bewertetem Schallpegel in dB. Der Index X bezeichnet die Messstrecken A, B, C und D. Die Dämpfung im Waldgebiet wird durch Fettdruck hervorgehoben.

	Gegenwind		Mitwind	
$\Delta\Delta L_X _{S1/S0}$	A	9	C	−2
	B	11	D	−2

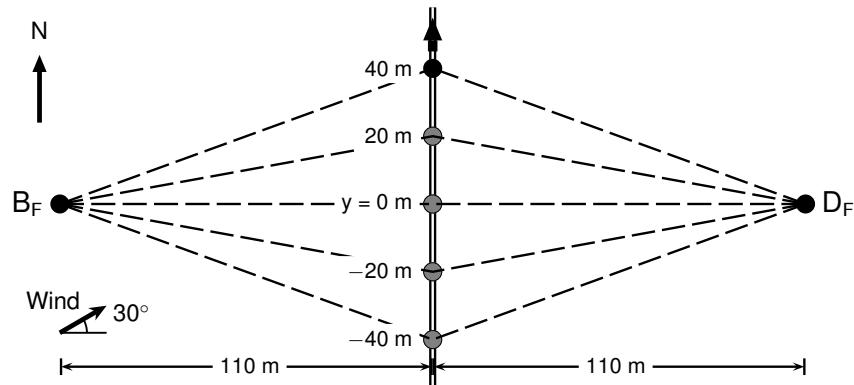


Abb. 6.18.: Skizze der Simulation mit einer sich bewegenden Schallquelle. Die Fortbewegung der Quelle entlang der Gleise (gekennzeichnet durch Doppellinie) wird räumlich alle 20 m aufgelöst. Die verschiedenen Quellpositionen werden durch graue Punkte dargestellt, an denen die Vertikalschnitte (gestrichelte Linien) zur Berechnung der Schallausbreitung zu den Fernfeld-Mikrofonen entnommen werden.

weichen von der Frequenzzusammensetzung der gemessenen Schallereignisse ab (siehe Abb. 5.6) und führen zu einer Unstimmigkeit der Ergebnisse.

Außerdem wurde angenommen, dass der maximale Schallpegel bei der geringsten Ausbreitungsentfernung erreicht wird. Angesichts der Einflüsse des Windes ist diese Annahme eventuell nicht gültig, insbesondere wenn die Windgeschwindigkeit zunimmt, wie z. B. bei der Messstrecke B gegenüber der Messstrecke D. Um dies zu überprüfen, wird der Pegelverlauf einer sich entlang der Gleise bewegenden Quelle analysiert. Hierzu werden die berechneten Windfelder aus Abschnitt 6.2.1 (siehe Abb. 6.3) verwendet. Die Positionen der Quelle werden räumlich alle 20 m aufgelöst, siehe Abb. 6.18. Die Schallausbreitung bis zum Fernfeld-Mikrofon wird berechnet. Es wird darauf hingewiesen, dass die direkten Effekte des Waldes nach wie vor nicht berücksichtigt sind. Die Ausbreitungssituationen zu B_F und zu D_F unterscheiden sich lediglich durch das Windfeld und die Bodenbedingung.

Der berechnete Pegelverlauf an den Fernfeld-Mikrofonen B_F und D_F wird in Abb. 6.19 gezeigt. Die verschiedenen Positionen der Quelle beziehen sich auf die Schnittpunkte der Vertikalschnitte und der Gleise und nehmen nach Norden zu. Um die Windeinflüsse zu veranschaulichen, wird die berechnete Windgeschwindigkeit an den Mikrofonen, projiziert auf der Ausbreitungsrichtung des Schalls, ebenfalls in der Abbildung dargestellt. Negative Werte entsprechen einer Ausbreitung bei Gegenwind und positive Werte bei Mitwind. Bei Gegenwind (Kurven mit Punkt-Markierung) wird der maximale Pegel erreicht,

Tab. 6.11.: Berechnete Zusatzdämpfung $\Delta\Delta L$ aufgrund Unterdrückung der Meteorologie, Angaben in A-bewertetem Schallpegel in dB. Der Index X bezeichnet die Messstrecken A, B, C und D. Die Dämpfung im Waldgebiet wird durch Fettdruck hervorgehoben.

		Gegenwind	Mitwind
$\Delta\Delta L_{X S6/S0}$	A	-5	C 5
	B	-3	D 6

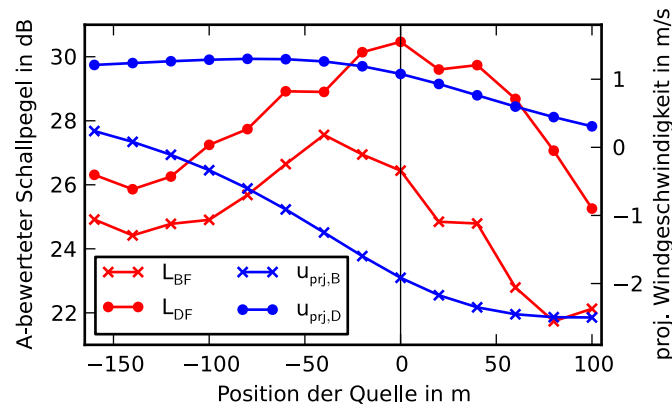


Abb. 6.19.: Verlauf der berechneten Schallpegel (L_{BF} und L_{DF} , rot) und der berechneten Windgeschwindigkeiten ($u_{prj,B}$ und $u_{prj,D}$, blau) an den Fernfeld-Mikrofonen. Die Windgeschwindigkeiten sind auf der Ausbreitungsrichtung des Schalls projiziert. Die Positionen der Quelle beziehen sich auf die Schnittpunkte der Vertikalschnitte und der Gleise und nehmen nach Norden zu (Abb. 6.18). Die mit Kreuzen und mit Punkten gekennzeichneten Kurven stellen jeweils die Werte an B_F bzw. D_F dar.

wenn sich die Quelle 40 m südlich des Schnittpunkts befindet. Dieser ist im Vergleich zu dem bisher angenommenen Schallpegel, mit der Quelle am Schnittpunkt, um 1 dB höher. Der projizierte Gegenwind ist bei der Fortbewegung zwischen diesen Positionen um 1 m/s schwächer. Bei Mitwind (Kurven mit Kreuz-Markierung) liegt der maximale Pegel dort vor, wenn sich die Quelle auf dem Schnittpunkt befindet. Damit wird die bisherige Annahme als zutreffend bestätigt. Die auf die Schallausbreitung bezogene Windgeschwindigkeit ändert sich weniger bei Mitwind als bei Gegenwind.

Tab. 6.12.: Berechnete Zusatzdämpfung $\Delta\Delta L$ aufgrund modifizierter Bedingungen im Waldgebiet, Angaben in A-bewertetem Schallpegel in dB.

	Bedingung	Im Waldgebiet
$\Delta\Delta L_D _{S6/S0}$	Ohne Meteorologie	6 ^a
	Verschiedene Böden	3 ^b
		-2 ^c
$\Delta\Delta L_D _{S7/S0}$	Windabschirmung	5
$\Delta\Delta L_D _{S8/S0}$	Schallabschirmung	41

^a $\sigma = 50 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ^b $\sigma = 200 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

^c $\sigma = 2000 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

7. Berechnung direkter Waldeffekte am Beispiel des Feldexperiments

Fortsetzend aus dem vorangegangenen Kapitel werden in diesem Kapitel die direkten Waldeffekte untersucht. Das setzt voraus, dass die Bäume im Rechenggebiet dargestellt werden müssen. Dies dreidimensional zu realisieren, ähnlich wie in Kapitel 3, würde zu einem sehr hohen Rechenaufwand führen. Eine direkte Projizierung von Bäumen auf den Vertikalschnitt ist ebenfalls ungeeignet, da diese die Schallwellen wie eine Wand blockieren würde.

Zur Modellierung der direkten Waldeffekte sind bereits einige Ansätze in den vergangenen Studien bekannt, siehe Abschnitt 1.2. Dazu gehören in erster Linie die Annäherung von Baumstamm durch Zylinder (Embleton, 1966; Heimann, 2003) sowie die Annäherung von Baumkrone durch Zylindergruppe (Swearingen und White, 2007) bzw. durch Kugel (Wunderli, 2012). In der vorliegenden Arbeit wird ein neuer Ansatz zur Modellierung von Waldstück vorgestellt, der aus der Untersuchung in Kapitel 3 hervorgeht. Das Waldstück wird aus einer Vielzahl von zufällig verteilten Quadraten idealisiert dargestellt, welche die Baumteile in Hinsicht der akustischen Effekte (Reflexion und Streuung) zweidimensional nachbilden. Hierbei werden die berechneten Windfelder sowie das akustische Rechenggebiet mit den Ausbreitungsbedingungen aus Kapitel 6 verwendet. Somit werden die indirekten Effekte des Waldes im Modell mitberücksichtigt, siehe Abb. 7.1. Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse werden die Dämpfungsparameter hinsichtlich der Waldgestaltung untersucht und die Rechenergebnisse mit den Messergebnissen validiert.

In Abschnitt 7.1 wird die Konfiguration der Schallsimulationen erläutert. Die Rechenergebnisse werden in Abschnitt 7.2 präsentiert und in Abschnitt 7.3 werden diese Ergebnisse

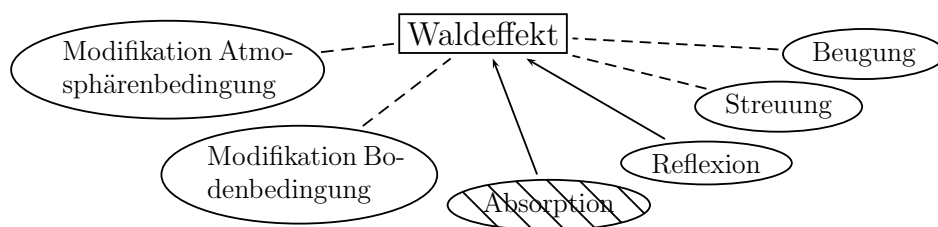


Abb. 7.1.: Skizze über Dämpfungsprozesse der berücksichtigten Waldeffekte. Die nicht miteinbezogenen Effekte sind schraffiert dargestellt.

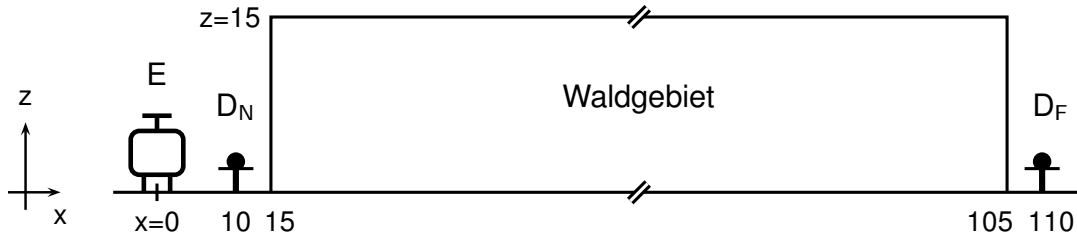


Abb. 7.2.: Skizze des Rechengebietes für die Schallausbreitung an einem Waldgebiet. Die Bezeichnung E kennzeichnet die Emission und D_N und D_F die Mikrofonpositionen. Die Waldgrenzen werden im Abstand von 5 m zu den Mikrofonen gesetzt. Die Höhe des Waldgebiets beträgt 15 m.

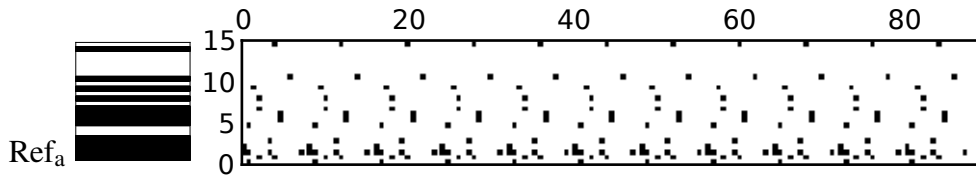


Abb. 7.3.: Beispiel zweidimensionaler Gestaltung des Waldgebiets mit zufällig verteilten Quadraten, Maßeinheit in Meter. Links – Frontansicht (auf y - z -Ebene) mit einer unendlich weiten horizontalen Ausdehnung; rechts – Seitenansicht (auf x - z -Ebene).

untereinander sowie auch mit den Ergebnissen aus Kapitel 5 und 6 verglichen.

7.1. Konfiguration der Simulationen

Ausgangspunkt dieses Versuchs ist die Ausbreitungssituation der Messstrecke D im Feldexperiment in Langweid, siehe Kapitel 5. Das simulierte Windfeld und die Topografie sowie die Positionen der Emission und Mikrofone aus Abschnitt 6.1 werden beibehalten. Ebenfalls wird das akustische Rechengebiet übernommen, mit der gleichmäßigen Maschenweite von $\Delta l_{x,y,z} = 0.021$ m. Die Waldgrenzen werden so gesetzt, dass ein Abstand von 5 m zum Mikrofon eingehalten wird, siehe die Skizze in Abb. 7.2. Die Höhe des Waldgebiets beträgt 15 m und entspricht der beobachteten Waldhöhe im Feldexperiment.

Das Waldgebiet wird in x -Richtung gleichmäßig in 11 Teilgebiete aufgeteilt. Jedes Gebiet besitzt die Abmessung von 8 m Breite und 15 m Höhe, analog zu den Untersuchungen in Abschnitt 3.1. Im Teilgebiet werden Hindernisse in quadratischer Form eingesetzt, um idealisierte Bäume zu bilden. Diese sind als totalreflektierende Festkörper im Modell implementiert. Ein Beispiel über die Gestaltung des Waldgebiets wird in Abb. 7.3 gezeigt. Im linken Diagramm sieht man die Projektion der Hindernisse auf die y - z -Ebene. Aufgrund der zweidimensionalen Rechnung ist die horizontale Achse als unendlich weit zu betrachten. Im rechten Diagramm wird die Seitenansicht des Waldgebiets (x - z -Ebene) dargestellt, das in diesem Beispiel aus 11 gleich gestalteten Teilgebieten besteht.

Aus der Front- und Seitenansicht der Abb. 7.3 lassen sich zwei Vergleichsgrößen hin-

sichtlich der Belegung der Hindernisse im Waldgebiet wie folgt ableiten

$$\Phi_F = \frac{l_{z,H}}{L_{z,Wald}} \quad (7.1)$$

$$\Phi_S = \frac{S_H}{S_{Wald}}, \quad (7.2)$$

wobei $l_{z,H}$ die Gesamtstrecke der auf der z -Achse projizierten Hindernisse darstellt und $L_{z,Wald}$ die Höhe des Waldgebiets. S_H und S_{Wald} kennzeichnen jeweils die auf der x - z -Ebene projizierte Fläche der Hindernisse bzw. des Waldgebiets. Φ_F ist analog zu dem verwendeten Frontflächenanteil im 3-D Fall in Kapitel 3 und Φ_S analog zu dem Volumenanteil.

Um einen Bezug zu den untersuchten Baumstrukturen (Fichten, Eiche und Platane) in Abschnitt 3.3 herzustellen, werden die Hindernisse so verteilt, dass der Anteil der Projektion in Frontansicht $\Phi_F = 55 \%$ beträgt und der Anteil der Projektion in Seitenansicht $\Phi_S = 5.5 \%$. Mit diesen Bedingungen werden drei Testobjekte mit einer zufälligen Verteilung separat erzeugt. In jedem Experiment wird das jeweilige Testobjekt elffach wiederholt und hintereinander gelegt und das Waldgebiet somit befüllt. Durch die Vervielfachung werden Φ_F und Φ_S nicht verändert. Diese Fälle dienen den darauf folgenden Untersuchungen als Referenz und werden jeweils als Ref_{a,b,c} benannt.

Ausgehend von den Referenzfällen wird im Folgenden die Hindernisparameter im Waldgebiet mittels einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Die zu überprüfenden Parameter sind:

1. Walddichte in Frontansicht
Längenverhältnis der auf der z -Achse projizierte Hindernisse zur Waldhöhe, in m/m, Testfälle T_i -11 und T_i -12 mit $i = a, b, c$;
2. Walddichte in Seitenansicht
Flächenverhältnis der Hindernisse zum Waldgebiet, in m^2/m^2 , Testfälle T_i -21 und T_i -22;
3. Teilgröße der Hindernisse
Breite der einzelnen quadratischen Hindernisse, in m, Testfälle T_i -31 und T_i -32.

Eine Übersicht der Testfälle ist in Tab. 7.1 gegeben. Hierbei werden die Testobjekte von Ref_{a, b, c} in Hinsicht des untersuchten Parameters variiert. Die anderen Parameter werden gleich gehalten. Bei T_i -11 und T_i -12 werden die Hindernisse in jedem zweiten Teilgebiet vertikal um 0.21 m bzw. 0.42 m verschoben. Diese Längen entsprechen jeweils der 10-fachen und der 20-fachen Maschenweite im Rechengebiet. Φ_F nimmt damit zu, während Φ_S unverändert bleibt. Bei T_i -21 und T_i -22 werden die Teilgebiete in regelmäßigen Abständen weggelassen, um die Walddichte in longitudinaler Richtung zu reduzieren, siehe Beispiele in Abb. 7.4. Dabei ändert sich Φ_S nicht. Bei T_i -31 und T_i -32 werden die Hindernisse in vier bzw. neun gleich große Teile zerkleinert und diese erneut verteilt. Die Neuverteilung erfolgt auf eine bestimmte Weise, sodass Φ_F und Φ_S beibehalten werden.

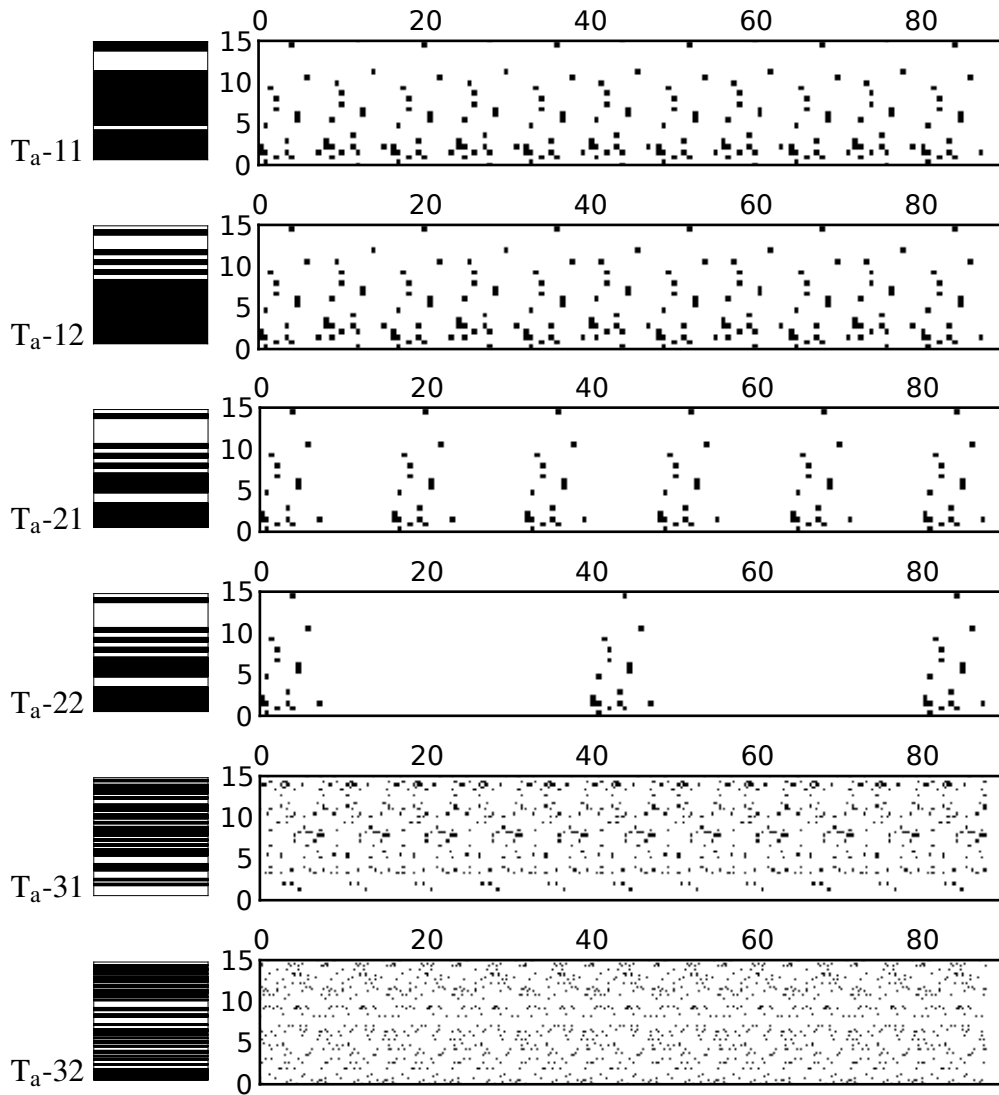


Abb. 7.4.: Beispiel der Gestaltung des idealisierten Waldgebiets, Ausgangsfall Ref_a (siehe Abb. 7.3), Maßeinheit in Meter. Links — Frontansicht (Projektion auf y - z -Ebene); rechts — Seitenansicht (Projektion auf x - z -Ebene). T_a -11 — Verschiebung der Hindernisse in jedem zweiten Teilgebiet um 10 Maschen; T_a -12 — Verschiebung der Hindernisse in jedem zweiten Teilgebiet um 20 Maschen; T_a -21 — Verdünnung des Waldes auf 6 Teilgebiete; T_a -22 — Verdünnung des Waldes auf 3 Teilgebiete; T_a -31 — Zerkleinerung der Hindernisse auf $d_H = 0.32$ m; T_a -32 — Zerkleinerung der Hindernisse auf $d_H = 0.21$ m.

7.2. Rechenergebnis

Die Schallsimulationen erfolgen ähnlich wie in Abschnitt 6.1.2. Unter den Referenzfällen werden deutlich unterschiedliche Pegelverteilungen festgestellt, siehe Abb. 7.5. Offensichtlich spielt die Verteilung der Hindernisse in diesem Experiment eine wichtige Rolle, insbesondere in unmittelbarer Bodennähe. Mit Berücksichtigung der Luftabsorption und A-Bewertung ergeben sich zwischen D_N und D_F die folgenden Schalldämpfungen: $\Delta L_{\text{Ref}_a} = 48$ dB, $\Delta L_{\text{Ref}_b} = 50$ dB und $L_{\text{Ref}_c} = 36$ dB. Obwohl alle drei zu untersuchenden Hindernisparameter konstant gehalten sind, beträgt der Unterschied der Schalldämpfungen bis zu 14 dB. Aufgrund dieser Diskrepanz werden die Ergebnisse nicht gemittelt. Die daraus modifizierten Testfälle werden immer mit den entsprechenden Referenzfällen verglichen.

Die Rechenergebnisse werden in Tab. 7.2 dargestellt. Bei T_{i-11} und T_{i-12} (mit $i = a, b, c$) wird durch Erhöhung des Frontflächenanteils Φ_F keine signifikante Veränderung der Schalldämpfung festgestellt.

Die Reduzierung des Seitenflächenanteils Φ_S , in den Fällen T_{i-21} und T_{i-22} , führt zur geringeren Dämpfung, wobei eine Ausnahme bei T_{c-21} mit einer Dämpfungserhöhung von 2 dB auftritt. In den Fällen, in denen die Hindernisse vergleichsweise eine hohe Dichte in Bodennähe aufweisen, ist die Dämpfungsreduzierung mit abnehmendem Seitenflächenanteil Φ_S besonders deutlich. Diese ist z. B. bei T_{b-22} um 11 dB geringer gegenüber Ref_b .

Unter T_{i-31} und T_{i-32} beträgt die Veränderung der Schalldämpfung bis zu 22 dB. Durch die Zerkleinerung und gleichzeitig die Neuverteilung der Hindernisse wird keine eindeutige Tendenz der Dämpfungsveränderung beobachtet.

7.3. Diskussion

Durch die Sensitivitätsanalyse wird festgestellt, dass die Verteilung der Hindernisse im Waldgebiet eine entscheidende Rolle für die Schalldämpfung spielt. Der Dämpfungseffekt

Tab. 7.1.: Übersicht über die Parameter zur Charakterisierung des Waldgebiets.

	Φ_F in %	Φ_S in %	d_H in m
$\text{Ref}_{a,b,c}$	55	5.5	0.63
$T_{a,b,c-11}$	63	5.5	0.63
$T_{a,b,c-12}$	72	5.5	0.63
$T_{a,b,c-21}$	55	3.0	0.63
$T_{a,b,c-22}$	55	1.5	0.63
$T_{a,b,c-31}$	55	5.5	0.32
$T_{a,b,c-32}$	55	5.5	0.21

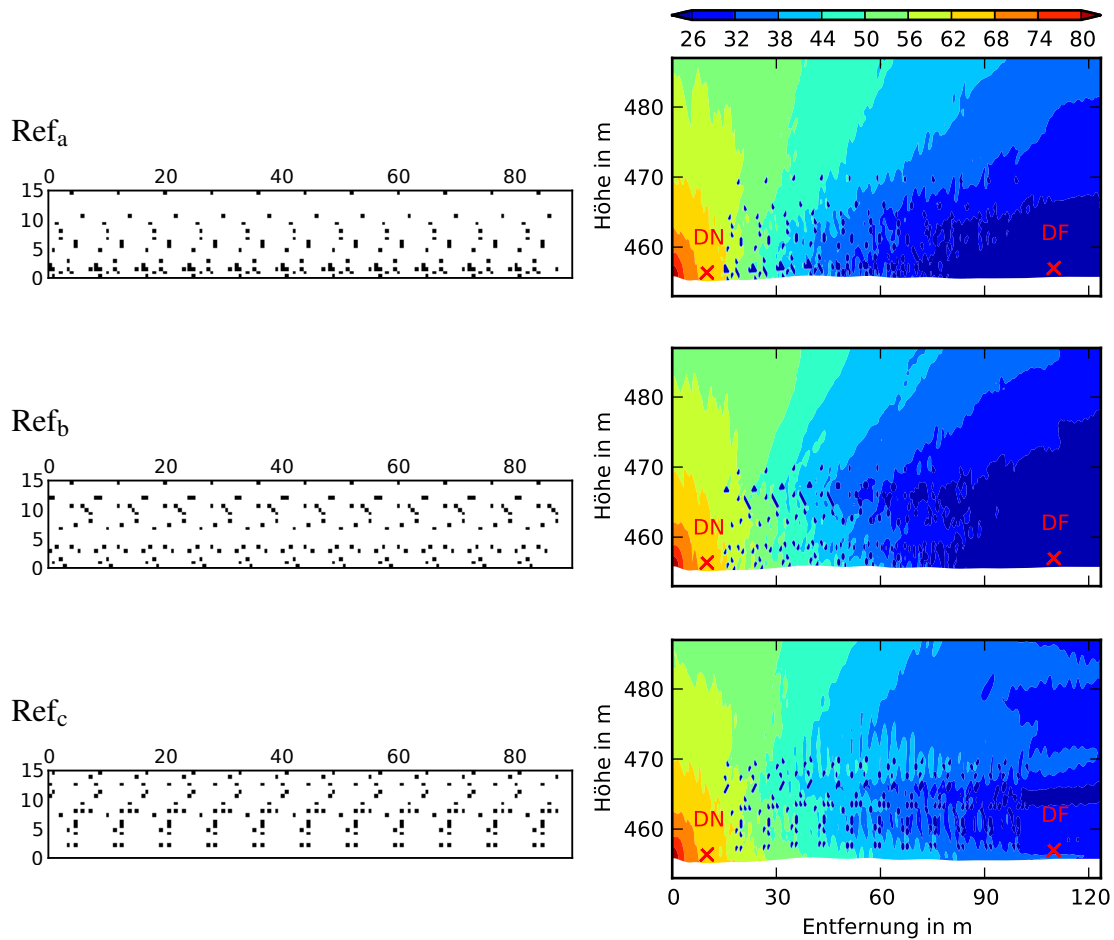


Abb. 7.5.: Idealisierte Waldgebiete (links) und resultierte Schallfelder im Vertikalschnitt (rechts), unbewerteter Schallpegel gemäß der Farbskala in dB dargestellt. Die Schallemission befindet sich 0.172 m über Grund. Im linken Diagramm bezieht sich die Abmessung in Meter auf das Waldgebiet, im rechten Diagramm bezieht sich die Entfernung auf den Emissionsort. Das Bodenprofil wird in Weiß abgebildet. Die Kreuze markieren die Immissionsorte.

Tab. 7.2.: Berechnete Schalldämpfung ΔL im idealisierten Wald, Angaben in A-bewertetem Schallpegel in dB.

		$i = a$	$i = b$	$i = c$
Referenzfall	Ref _i	48	50	36
Variation an Φ_F	T _i -11	49	51	36
	T _i -12	48	52	37
Variation an Φ_S	T _i -21	43	46	38
	T _i -22	39	39	34
Variation an d_H	T _i -31	41	51	24
	T _i -32	55	50	46

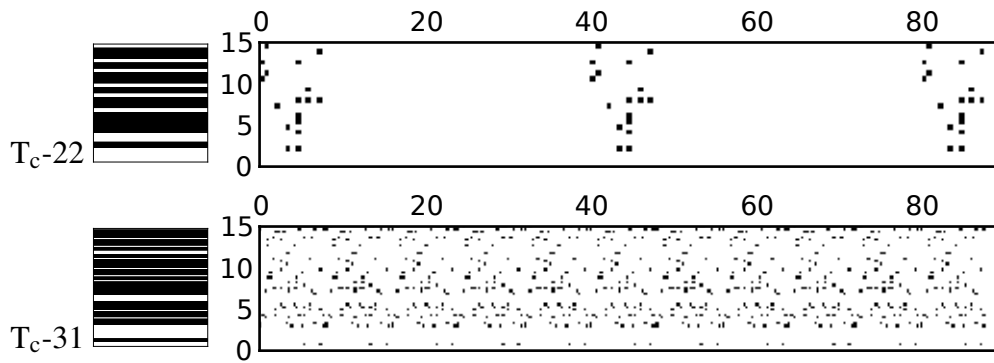


Abb. 7.6.: Gestaltung der Waldgebiete T_c -22 (oben) und T_c -31 (unten), Maßeinheit in Meter. Links — Frontansicht (Projektion auf y - z -Ebene); rechts — Seitenansicht (Projektion auf x - z -Ebene).

ist besonders stark, wenn die Hindernisse in einer hohen Dichte in Bodennähe vorliegen. Grund dafür ist die Verwendung der bodennahen Punktquelle als Emission im Gegensatz zu der ebenen Welle in Kapitel 3. Die Schallausbreitung einer Punktquelle wird stärker durch Hindernisse abgeschwächt als die einer Linienquelle bzw. einer ebenen Quelle. Wenn die Hindernisse in eine größere Höhe verteilt werden, kann die Dämpfung um 14 dB sinken (vergleiche dazu Ref_b mit Ref_c).

Die Reduzierung der Hindernisdichte in longitudinaler Richtung führt zu einer geringeren Dämpfung. Im Gegensatz dazu hat die Erhöhung der Hindernisdichte in vertikaler Richtung keinen signifikanten Einfluss auf die Dämpfung. Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit den in Abschnitt 3.3.

Die berechnete Dämpfung bei T_c -22 ($\Delta L = 34$ dB) entspricht am besten der gemessenen Dämpfung von 30 dB (siehe Tab. 5.8). Die Gestaltung des Waldgebiets in diesem Fall ist in Abb. 7.6 zu sehen. Hierin genügen bereits wenige Hindernisse, um die direkten Waldeffekte wiederzugeben.

Im Testfall T_c -31 wird eine nahezu gleiche Dämpfung ($\Delta L = 24$ dB) wie die Simulation unter Messsituation in Kapitel 6 berechnet ($\Delta L_D = 23$ dB, siehe Tab. 6.3), in der ausschließlich die indirekten Waldeffekte berücksichtigt wurden. Trotz der Vielzahl der Hindernisse (siehe Abb. 7.6) nimmt die Dämpfung nur um 1 dB zu. Hierbei kann sich der Schall im unteren Bereich ($z < 3$ m) des Waldgebiets fast ungestört ausbreiten. An den Hindernissen im oberen Bereich und am Boden findet die Reflexion statt, die womöglich die horizontale Ausbreitung begünstigt.

8. Schlussfolgerungen und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss von Wald auf die Schallausbreitung mit Hilfe von Messungen und Simulationen untersucht. Dadurch konnten die Ergebnisse miteinander evaluiert werden. Die direkten Baumeffekte wurden in einem hoch aufgelösten 3-D Modell berechnet. Mittels der Baumstrukturen aus Laserscanning-Messungen wurde der Einfluss einzelner Bäume einschließlich der Krone analysiert. Die Baumkrone erwies sich als ein sehr wichtiger Schalldämpfer in Verbindung mit dem Stamm. Verschiedene Möglichkeiten zur Idealisierung von Baum und Wald wurden erprobt, welche die direkten Effekte gut wiedergaben. Eine volumenbezogene Parametrisierung der Dämpfung wurde sowohl für einzelne Bäume als auch für ein Waldstück abgeleitet. Mit dieser können Unterschiede der Walddämpfung hinsichtlich des Waldbestandes, der Waldart und der Jahreszeit berücksichtigt werden. In dem Feldexperiment wurde am Beispiel von Zugvorbeifahrten die Gesamtdämpfung eines Fichtenwaldes bei Mitwind ermittelt. In der Nachrechnung des Feldexperiments wurden die indirekten Waldeffekte hinsichtlich Meteorologie und Boden quantifiziert. Die direkten Waldeffekte in dieser Rechnung wurde mit dem zuvor entwickelten Modellansatz simuliert. Eine der Messung gut angenäherte Dämpfung wurde erreicht.

8.1. Wesentliche Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse meiner Forschung werden im Folgenden unter Messungen und Simulationen unterschieden.

Messungen

- Die Ausbreitungsdämpfung auf offenem Gelände ist in einer neutralen Wetterlage, bei Mitwind mit einer Windgeschwindigkeit von weniger als 3 m/s, um 20 dB/(200 m) geringer als bei Gegenwind.
- Der Immissionspegel von Zugvorbeifahrten wird bei Mitwind durch den Wald gegenüber dem offenen Gelände um 13 dB/(100 m) reduziert. Somit stellt der Wald eine beachtliche Dämpfung im Vergleich zu der Gegenwind-Dämpfung (gegenüber Mitwind) dar.

Simulationen hinsichtlich indirekter Effekte

- Die indirekten Effekte von Wald bestehen aus dem meteorologischen Effekt und dem Bodeneffekt. Ein Wald reduziert die Windgeschwindigkeit und verstärkt bei Mitwind die Abwärtsbrechung. Dabei wird jedoch der Immissionspegel im Wald um 1 dB reduziert, wenn ein schallweicher Boden ($\sigma = 50 \text{ kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$) vorliegt. Mit einem schallharten Boden ($\sigma = 2000 \text{ kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$) erhöht die Wechselwirkung zwischen der Brechung und Bodenreflexion den Immissionspegel um bis zu 3 dB.
- In einer homogenen Atmosphäre schwächt der schallweiche Boden ($\sigma = 50 \text{ kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$) den Immissionspegel um 2 dB ab (gegenüber $\sigma = 200 \text{ kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$). Liegt ein schallharter Boden ($\sigma = 2000 \text{ kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$) vor, so wird der Immissionspegel um 6 dB erhöht.
- Wird der Wind im Wald vollständig abgeschirmt, so wird eine Zusatzdämpfung gegenüber dem offenen Gelände von 5 dB erreicht.

Simulationen hinsichtlich direkter Effekte

- Die direkten Effekte von Baum bzw. Waldstück setzen sich aus der Reflexion, Absorption, Streuung und Beugung zusammen. Für die untersuchte Emission (im Frequenzbereich $f < 3.5 \text{ kHz}$) und die verfügbaren Baumstrukturen aus Laserscanning-Messungen spielen die Reflexion und Streuung eine primäre Rolle. Hierbei kann die Baumkrone die Dämpfung um bis zu 1.4 dB gegenüber dem Stamm erhöhen.
- Ein voluminöser Baum bietet bis zu 4 dB mehr Dämpfung als ein weniger voluminöser Baum, wie z. B. Platane gegenüber Fichte.
- Die baumähnlichen Strukturen und idealisierten Baumstrukturen können die Schalldämpfung der „echten“ Bäume hinsichtlich des Gesamtpegels gut nachbilden.
- Zwischen der Volumendichte von Baum bzw. Wald und der Schalldämpfung besteht eine funktionale Beziehung. Mit den empirisch entwickelten Formeln (Gln. (3.4), (3.5), (4.10) und (4.11)) werden die Reflexion und Transmission gut beschrieben.

Simulationen hinsichtlich gesamter Effekte

- Die direkten Waldeffekte verursachen eine höhere Dämpfung als die indirekten Waldeffekte.
- Um die Schallausbreitung aus dem Schienen- bzw. Straßenverkehr besser zu dämpfen, empfiehlt sich ein Wald mit starkem Bewuchs in Bodennähe. Damit wird gleichzeitig die Bodendämpfung verstärkt.
- Der Kronenbereich besitzt nur eine geringe Wirkung, wenn unterhalb von ihm ein günstiger Ausbreitungsweg besteht.

8.2. Offene Fragen

In dieser Arbeit wurden die Waldeffekte in bestimmten Situationen berücksichtigt. Einige Fragen bleiben jedoch noch zu klären. Beispiele davon sind im Folgenden angegeben:

- Was ist die optimale Anordnung von Bäumen, um eine möglichst hohe Dämpfung zu erzielen?
- Verfügt ein Wald bei Gegenwind ebenfalls über eine schalldämpfende Wirkung?
- Wie stark kann ein Wald in der Nacht bzw. in der Inversionswetterlage den Schall dämpfen?
- Besitzt eine hohe Hecke eine vergleichbare Schalldämpfung wie ein Waldstück?

8.3. Ausblick

Die schalldämpfende Wirkung von Wald wurde in dieser Arbeit am Beispiel eines Fichtenwaldes eindeutig bestätigt. Eine Zusatzdämpfung von 13 dB/(100 m) wurde bei Mitwind ermittelt. Es wäre wünschenswert, die Studie durch weitere Szenarien zu erweitern, wie z. B. für eine Inversionswetterlage. Eine Untersuchung über diese Effekte über eine größere Entfernung wäre ebenfalls für weitere Anwendungsmöglichkeiten sehr wichtig.

Die berechneten Ausbreitungsdämpfungen im Freien konnten die Messergebnisse qualitativ wiedergeben. Um die Rechenergebnisse quantitativ zu verbessern, sind mehr Informationen insbesondere im Vertikalschnitt notwendig. Wenn in künftigen Studien weitere Messpunkte in verschiedenen Höhen berücksichtigt würden, könnten die Windfelder besser nachgebildet werden und somit wäre eine genauere Bestimmung der Dämpfung denkbar.

In der Modell-Rechnung wurden die direkten Effekte von Baum bzw. Wald untersucht. Eine volumen- bzw. flächenbezogene Dämpfung von Baum und Wald wurde festgestellt. Die Verwendung einer ebenen Quelle setzt eine große Entfernung der Ausbreitung voraus. Wenn stattdessen eine Punkt- bzw. Linienquelle benutzt wird, können zusätzliche Informationen über die Wirksamkeit der Bäume in Quellnähe erhalten werden. Diese sind besonders erforderlich, wenn man einzelne Baumreihen zum Schallschutz am Straßenrand einsetzen will. Es wäre empfehlenswert, die hierbei entwickelten Parameter durch Feldexperimente zu validieren. Ferner ist es interessant, durch eine Erweiterung der Modelle weitere Effekte, wie z. B. die Absorption an dünnen Ästen und Blättern, zu dieser komplexen Frage zu erhalten. Ein weiteres unbeantwortetes Thema sind Wechselwirkungen zwischen den direkten und indirekten Waldeffekten, für welche weitere Forschungen notwendig sind.

In dieser Arbeit wurden die wichtigsten Einflüsse eines Waldes auf die Schallausbreitung untersucht. Für die indirekten Effekte wurde anhand der Fallstudien der Wirkungsbereich festgestellt; für die direkten Effekte wurde ein von der Bewuchsart bzw. von der Jahreszeit abhängiger Parameter zum Abschätzen der Schalldämpfung vorgestellt. Für die

praktische Anwendung eines Waldstücks zum Zweck des Schallschutzes sind die Mindestanforderungen an Dichte bzw. Breite verschiedener Baumgattungen weiter zu erforschen. In der Hinsicht können die Kenntnisse dieser Arbeit dazu beitragen, eine ökologisch und ökonomisch geeignete Lösung gegen die steigende Lärmbelastung zu finden. Es ist vorstellbar, für verschiedenste Lärmsituationen individuell wirksame Büsche, Baumreihe und Waldstücke zum Zweck Schallschutz zu entwickeln und einzusetzen.

A. Berechnung der Schalldämpfung durch Bodenreflexion

Ausgehend von einer ebenen Welle wird der Reflexionskoeffizient der Schalldrucks am Boden nach Ingard (1951) wie folgt formuliert

$$R_p = \frac{\sin \theta - Z_0/Z_B}{\sin \theta + Z_0/Z_B}, \quad (\text{A.1})$$

mit θ dem Ein- bzw. Ausfallswinkel der Schallwellen am Boden und $Z_{0,B}$ jeweils der Schallimpedanz der Luft und des Bodens. Damit kann das Geschwindigkeitspotenzial am Empfänger wie folgt beschrieben werden

$$\Phi = \frac{e^{ik_0 r_1}}{r_1} + R_p \frac{e^{ik_B r_2}}{r_2}, \quad (\text{A.2})$$

wobei $r_{1,2}$ jeweils die Weglänge der direkten bzw. der reflektierten Wellen kennzeichnen und $k_{0,B}$ jeweils die Wellenzahl in der Luft und im Boden.

Mit Berücksichtigung der Ausbreitung aus einer Punktquelle wird Gl. (A.2) nach Rudnick (1947) mit einem einen Verlustfaktor F (engl. Boundary Loss Factor) angepasst

$$\Phi = \frac{e^{ik_0 r_1}}{r_1} + [R_p + F(w)(1 - R_p)] \frac{e^{ik_B r_2}}{r_2}. \quad (\text{A.3})$$

Der Verlustfaktor ist eine Funktion von der sogenannten “numerischen Distanz” w , welche durch die folgende Formel bestimmt wird

$$w = \frac{2ik_0 r_2}{(1 - R_p)^2 \cos^2 \theta} \left(\frac{Z_0}{Z_B} \right)^2 \left(1 - \frac{k_0^2 \cos^2 \theta}{k_B^2} \right). \quad (\text{A.4})$$

Besitzt w einen kleinen Betrag, $|w| \leq 10$, so wird der Verlustfaktor mit der folgenden Annäherung berechnet

$$F(w) = 1 + i\sqrt{\pi w} e^{-w} - 2w e^{-w} \left(1 + \frac{w}{1!3} + \frac{w^2}{2!5} + \frac{w^3}{3!7} + \dots \right). \quad (\text{A.5})$$

Anderenfalls ($|w| < 10$) wird die folgende Annäherung verwendet

$$F(w) = -\left[\frac{1}{2w} + \frac{1 \cdot 3}{(2w)^2} + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{(2w)^3} + \dots\right]. \quad (\text{A.6})$$

Zur Berechnung der numerischen Distanz in Gl. (A.4) werden die Impedanz des Bodens und die Wellenzahl im Boden nach Delany und Bazley (1970a) sowie Chessell (1977) mit den empirischen Formeln bestimmt

$$Z_B = \rho_0 c_0 \left[\left(1 + 9.08 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.75}\right) - i \left(11.9 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.73}\right) \right] \quad (\text{A.7})$$

$$k_B = \frac{\omega_0}{c_0} \left[\left(1 + 10.8 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.70}\right) + i \left(10.3 \left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.59}\right) \right], \quad (\text{A.8})$$

mit ρ_0 der Dichte der Luft, c_0 die Schallgeschwindigkeit in der Luft und σ dem spezifischen Strömungswiderstand des Bodens. Die Kreisfrequenz errechnet sich aus der Schallfrequenz, $\omega_0 = 2\pi f$.

Somit lässt sich das Geschwindigkeitspotenzial in Gl. (A.2) bestimmen. Wird die zeitliche Schwankung mitbetrachtet, so lässt sich aus dem Geschwindigkeitspotenzial der Schalldruck mit der Bodenreflexion p_B ableiten

$$\begin{aligned} p_B(\mathbf{x}, t) &= -\rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t} \\ &= i\rho_0 \omega_0 \left\{ \frac{e^{ik_0 r_1}}{r_1} + [R_p + F(1 - R_p)] \frac{e^{ik_0 r_2}}{r_2} \right\} e^{-i\omega_0 t}, \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

mit \mathbf{x} dem Ortsvektor und t der Zeit. In der Freifeldausbreitung wird der Schalldruck p_F wie folgt formuliert

$$p_F(\mathbf{x}, t) = i\rho_0 \omega_0 \frac{e^{ik_0 r_1}}{r_1} e^{-i\omega_0 t}. \quad (\text{A.10})$$

Der relative Schallpegel mit Bodenreflexion im Vergleich zu dem in Freifeldausbreitung A_B errechnet sich aus

$$\begin{aligned} A_B &= L_{\text{mit Boden}} - L_{\text{Freifeld}} \\ &= 10 \lg(p_B^2 / p_F^2) \\ &= 20 \lg \left\{ 1 + [R_p + F(w)(1 - R_p)] \frac{e^{ik_0(r_2 - r_1)}}{r_2 / r_1} \right\}. \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

Ein positiver Wert bedeutet eine Pegelzunahme durch den Boden und ein negativer Wert eine Pegelabnahme.

B. Messwerte im Feldexperiment

Im Folgenden werden die gesamten Messdaten aus dem Feldexperiment in Kapitel 5 grafisch dargestellt. Die von den vier Messgeräten registrierten Schallpegel werden gemäß verschiedenen Farben im Zeitverlauf geplottet. Die Zuggattung und Fahrtrichtung sind jeweils in der Unterschrift angegeben.

Messperiode I

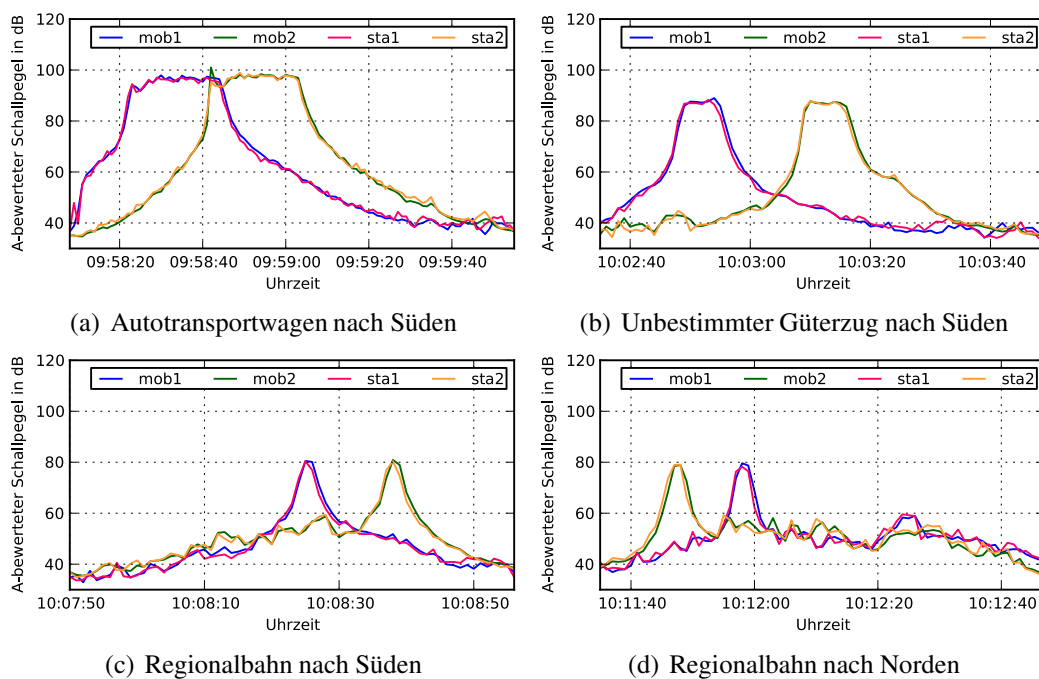


Abb. B.1.: Gemessener Pegelverlauf in Messperiode I - Teil 1

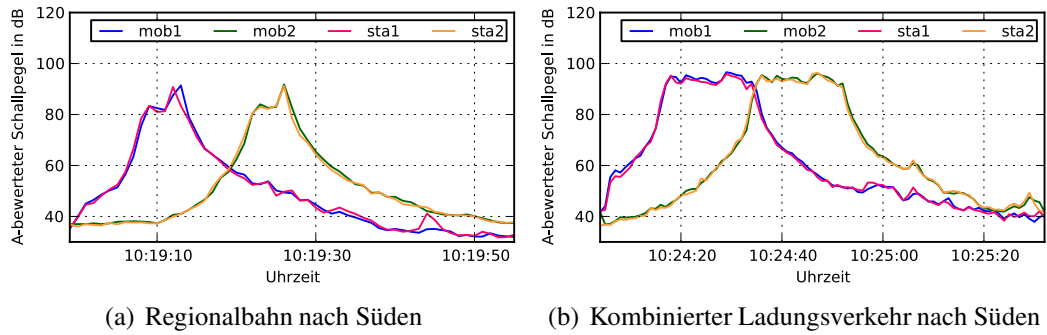


Abb. B.2.: Gemessener Pegelverlauf in Messperiode I - Teil 2

Messperiode II

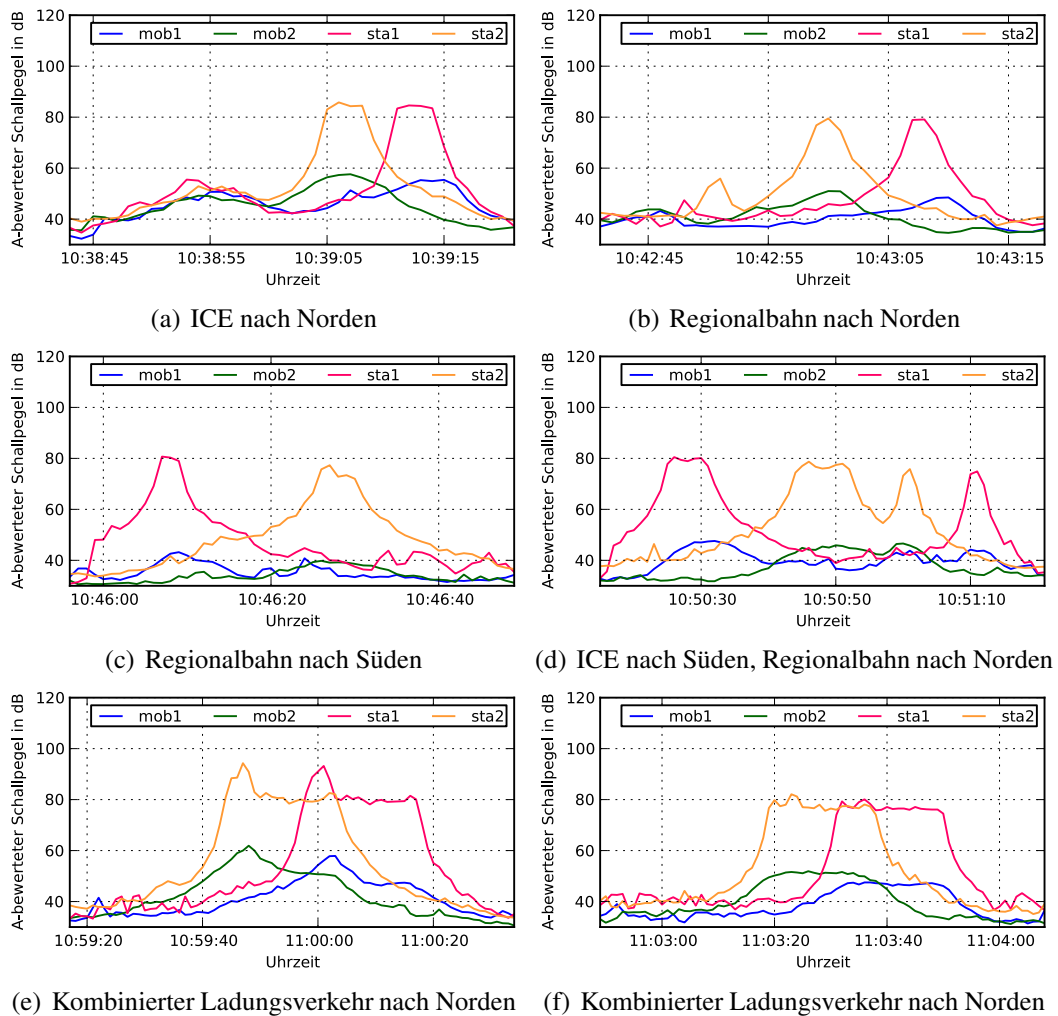


Abb. B.3.: Gemessener Pegelverlauf in Messperiode II - Teil 1

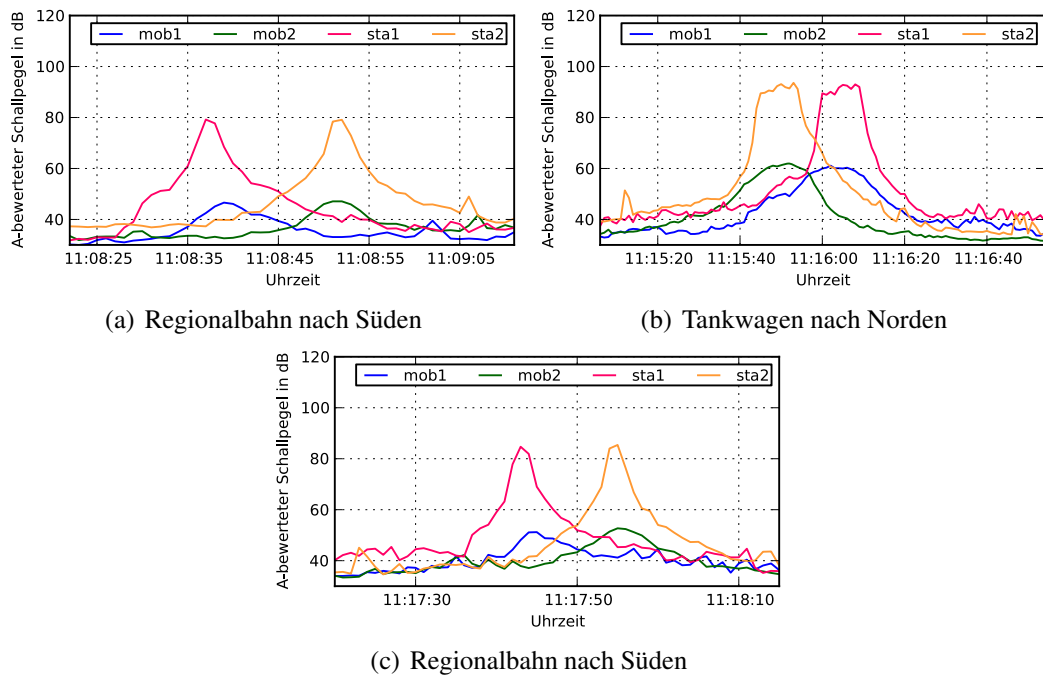


Abb. B.4.: Gemessener Pegelverlauf in Messperiode II - Teil 2

Messperiode III

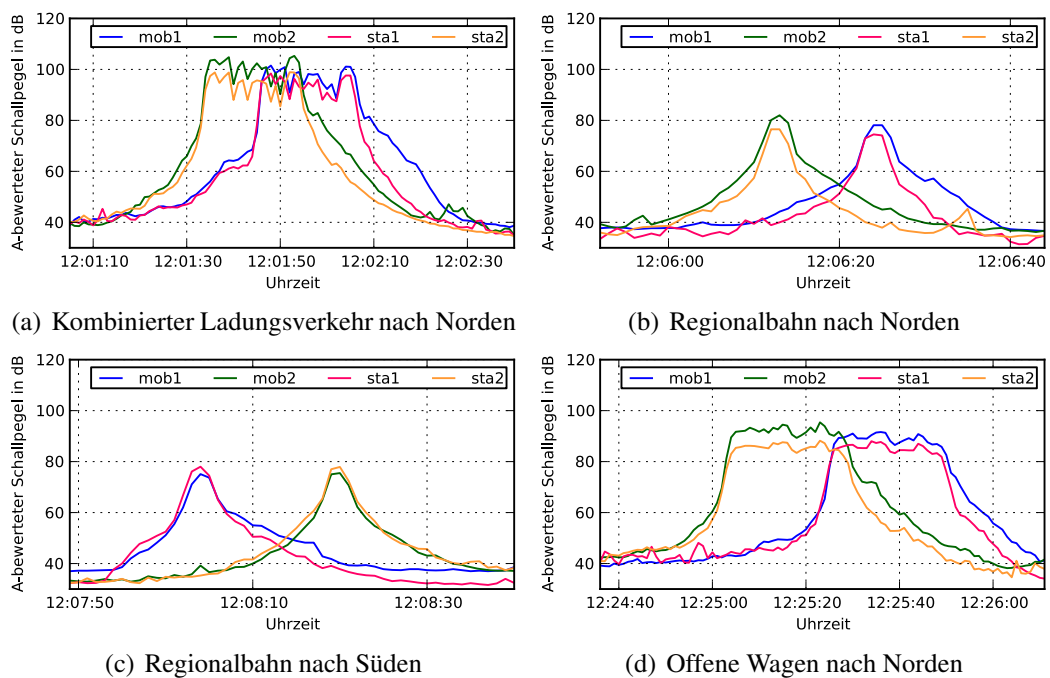


Abb. B.5.: Gemessener Pegelverlauf in Messperiode III - Teil 1

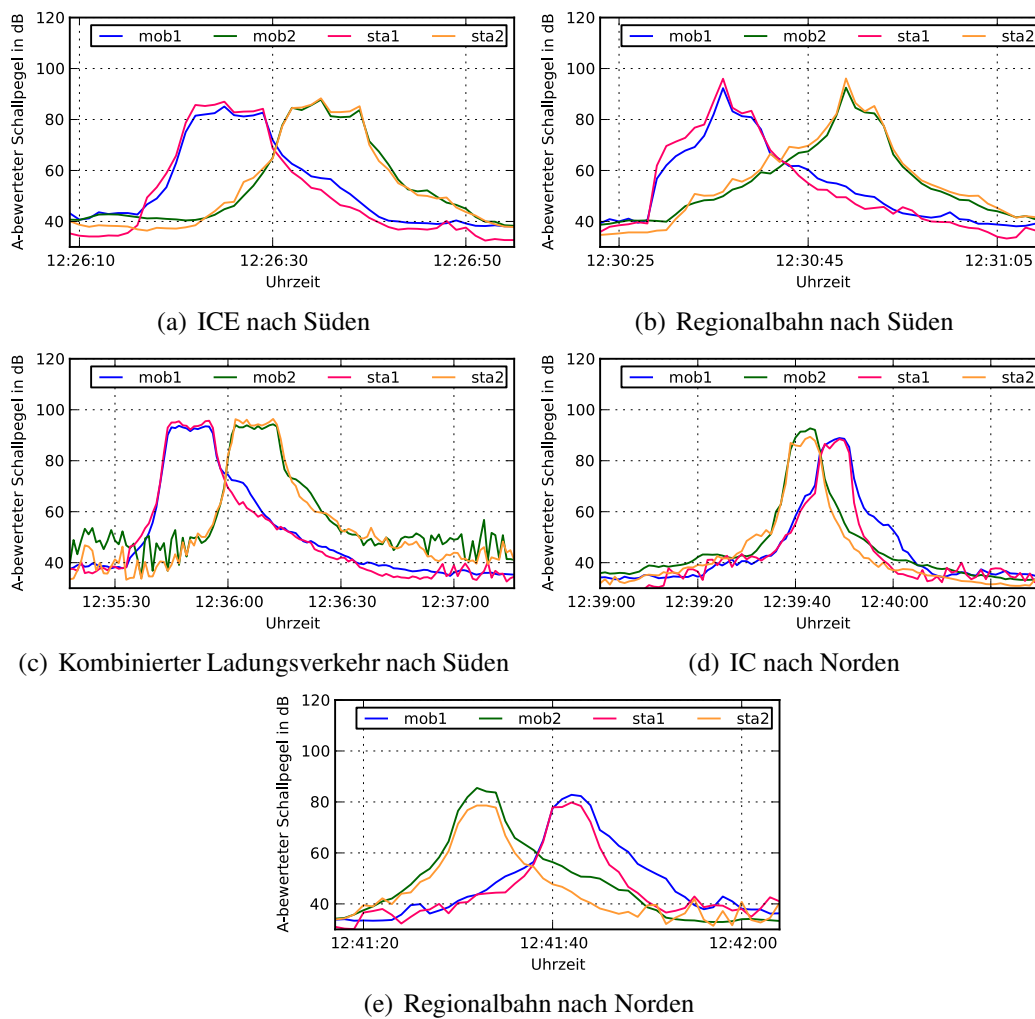


Abb. B.6.: Gemessener Pegelverlauf in Messperiode III - Teil 2

Messperiode IV

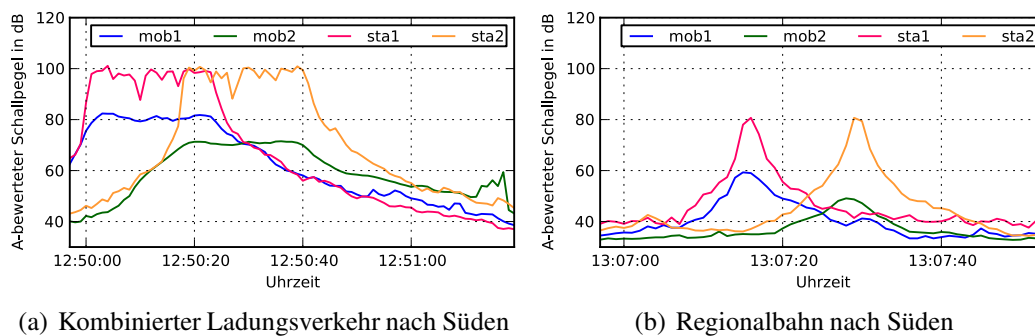


Abb. B.7.: Gemessener Pegelverlauf in Messperiode IV - Teil 1

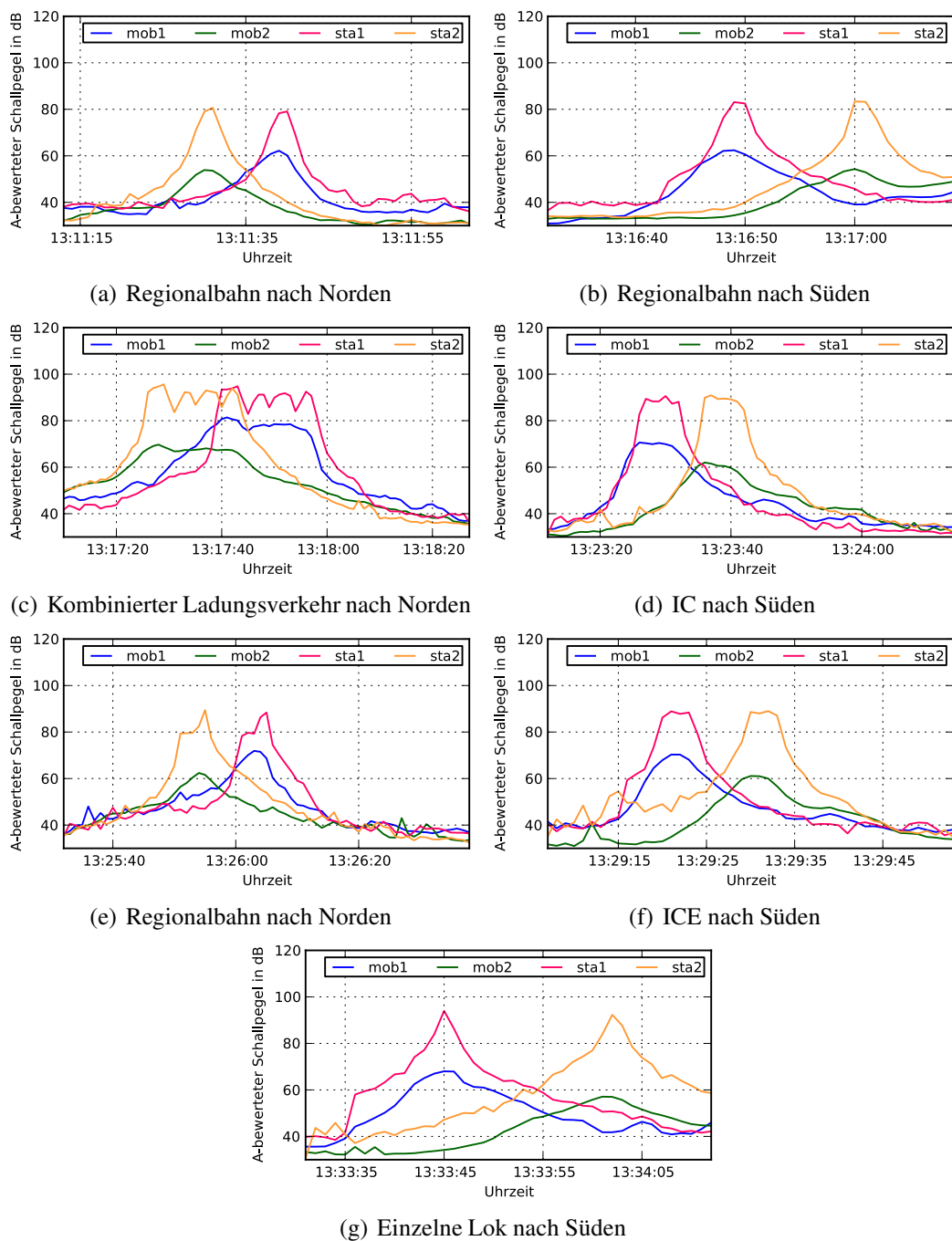


Abb. B.8.: Gemessener Pegelverlauf in Messperiode IV - Teil 2

C. Numerisch reproduzierte Wind- und Schallfelder

Im Folgenden werden zur Ergänzung zu Kapitel 6 die berechneten Wind- und Schallfelder verschiedener Szenarien angezeigt. Die Windgeschwindigkeit und die spektralen Schallpegel werden gemäß der Farbskala im Vertikalschnitt dargestellt.

Windfeld

Die berechneten Windfelder für die Messperiode II und IV sind jeweils in Abb. C.1 und C.2 angezeigt; die berechneten Windfelder für die Szenarien mit verstärktem und abgeschwächtem Wind sind in Abb. C.3 angezeigt.

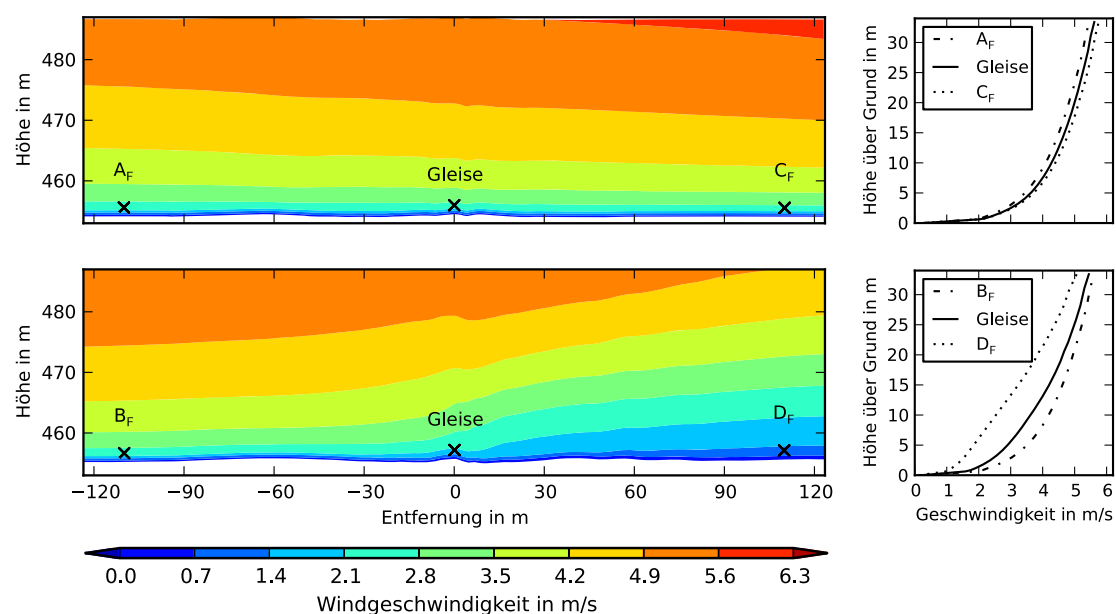


Abb. C.1.: West-Ost Komponente des berechneten Windfeldes für die Messperiode II, Windvektor auf die Schallausbreitungsrichtung projiziert, Entfernung auf die Gleise bezogen. Oben — Vertikalschnitt im Norden; unten — Vertikalschnitt im Süden; links — Verteilung der Windgeschwindigkeit im Vertikalschnitt, Angaben gemäß der Farbskala in m/s; rechts — vertikales Windprofil an Aufpunkten.

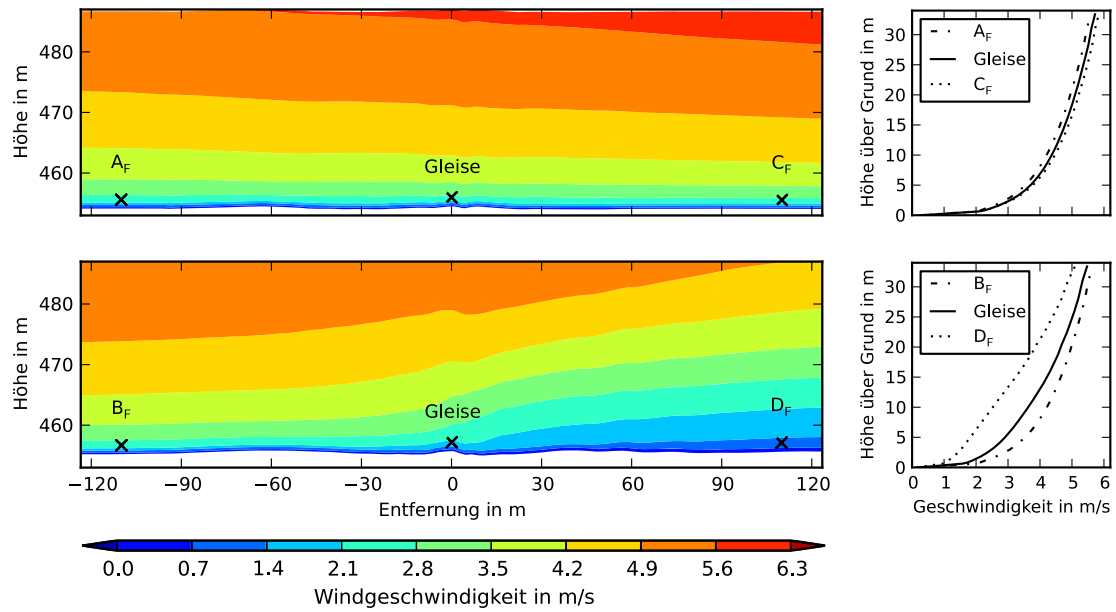


Abb. C.2.: West-Ost Komponente des berechneten Windfeldes für die Messperiode IV, Windvektor auf die Schallausbreitungsrichtung projiziert, Entfernung auf die Gleise bezogen. Oben — Vertikalschnitt im Norden; unten — Vertikalschnitt im Süden; links — Verteilung der Windgeschwindigkeit im Vertikalschnitt, Angaben gemäß der Farbskala in m/s; rechts — vertikales Windprofil an Aufpunkten.

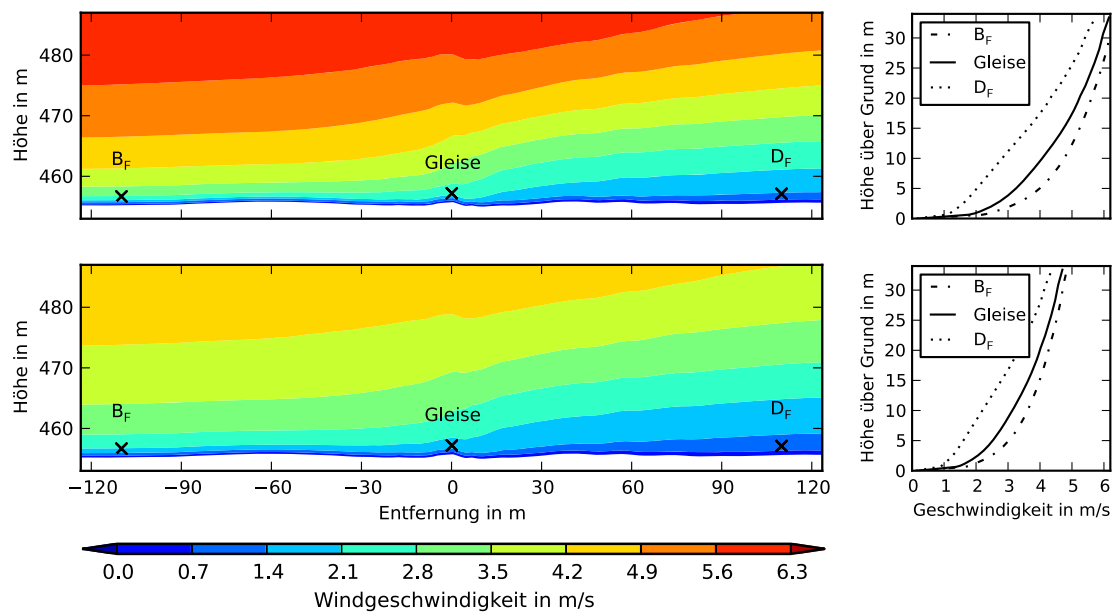


Abb. C.3.: West-Ost Komponente der berechneten Windfelder mit verstärktem und abgeschwächtem Wind im südlichen Vertikalschnitt, Windvektor auf die Schallausbreitungsrichtung projiziert, Entfernung auf die Gleise bezogen. Oben — mit verstärktem Wind; unten — mit abgeschwächtem Wind; links — Verteilung der Windgeschwindigkeit im Vertikalschnitt, Angaben gemäß Farbskala in m/s; rechts — vertikales Windprofil an Aufpunkten

Schallfeld

Die berechneten Schallspektren für die Szenarien mit labilerer ($\partial\Theta/\partial z = -1.35 \text{ K}/(100 \text{ m})$) und stabilerer ($\partial\Theta/\partial z = -0.65 \text{ K}/(100 \text{ m})$) Atmosphärenschiehtung sind jeweils in Abb. C.4 und C.5 angezeigt; die berechneten Schallspektren für die Szenarien mit verstärktem und abgeschwächtem Wind sind in Abb. C.6 und C.7 angezeigt. Die Höhe der Schallfelder beträgt 1.5 m über Grund.

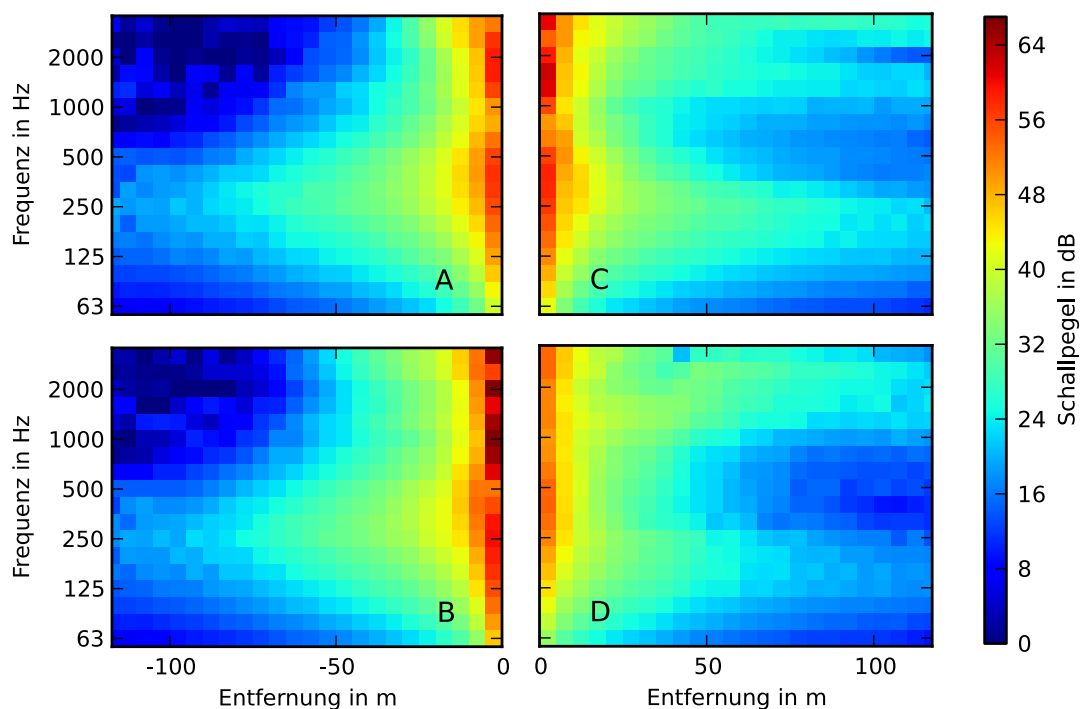


Abb. C.4.: Berechnete Schallspektren mit labilerer Atmosphärenschiehtung ($\partial\Theta/\partial z = -1.35 \text{ K}/(100 \text{ m})$), Horizontalschnitt in 1.5 m Höhe über Grund, A-bewerteter Schallpegel gemäß der Farbskala in dB

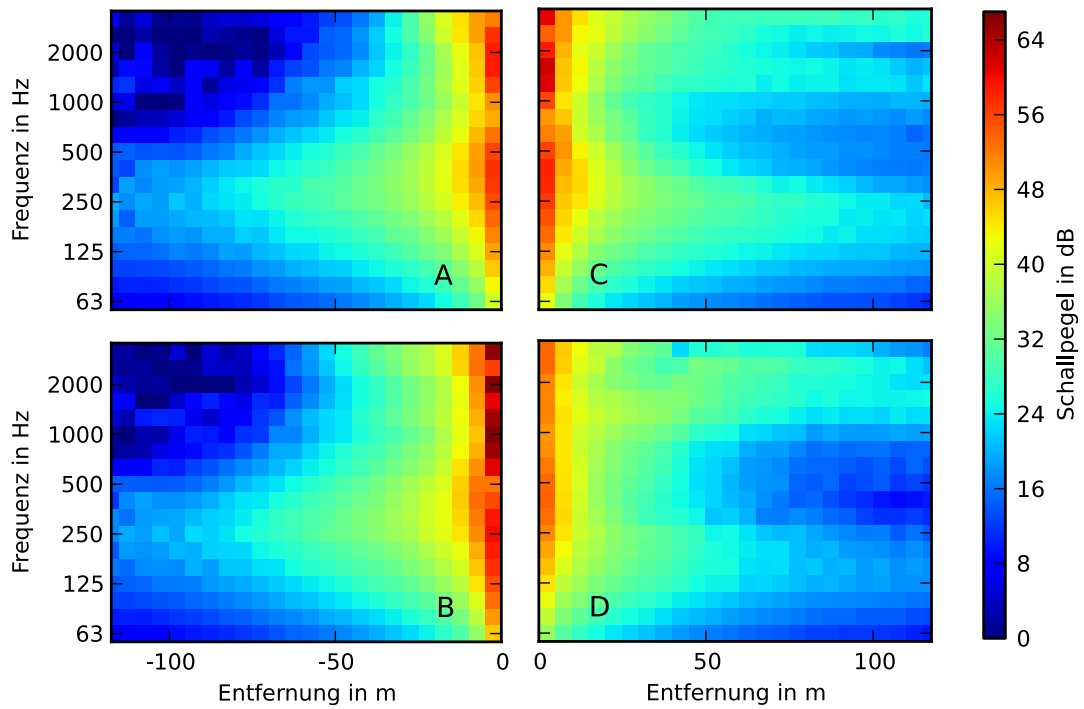


Abb. C.5.: Berechnete Schallspektren mit stabilerer Atmosphärensichtung ($\partial\Theta/\partial z = -0.65 \text{ K}/(100 \text{ m})$), Horizontalschnitt in 1.5 m Höhe über Grund, A-bewerteter Schallpegel gemäß der Farbskala in dB

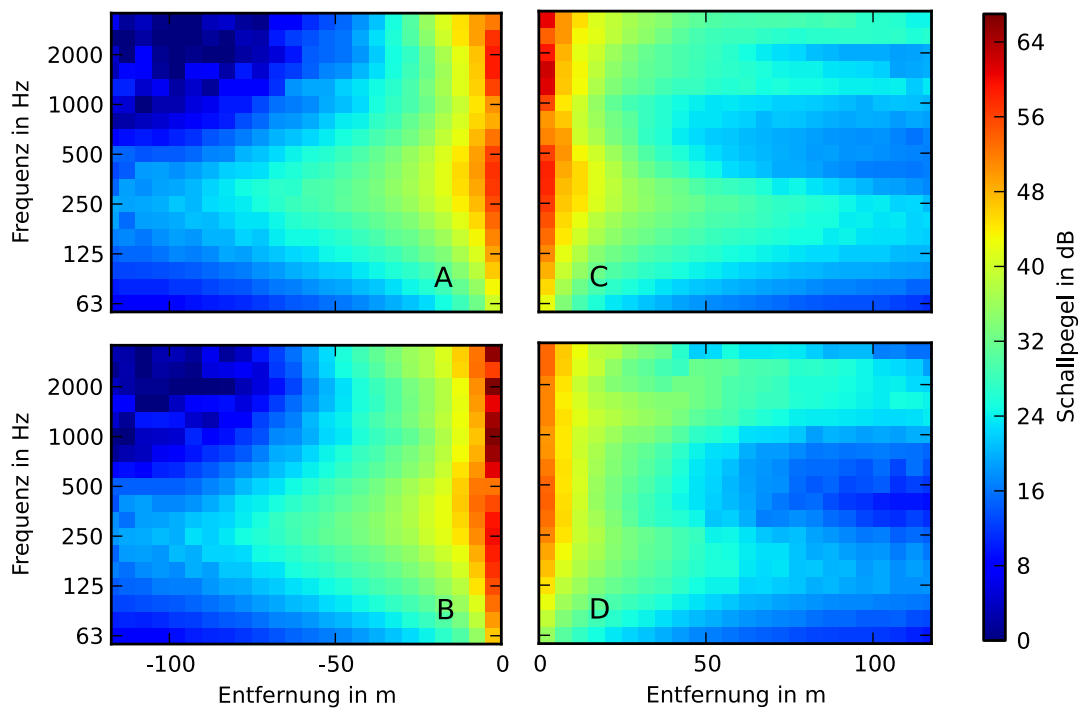


Abb. C.6.: Berechnete Schallspektren mit verstärkerem Wind, Horizontalschnitt in 1.5 m Höhe über Grund, A-bewerteter Schallpegel gemäß der Farbskala in dB

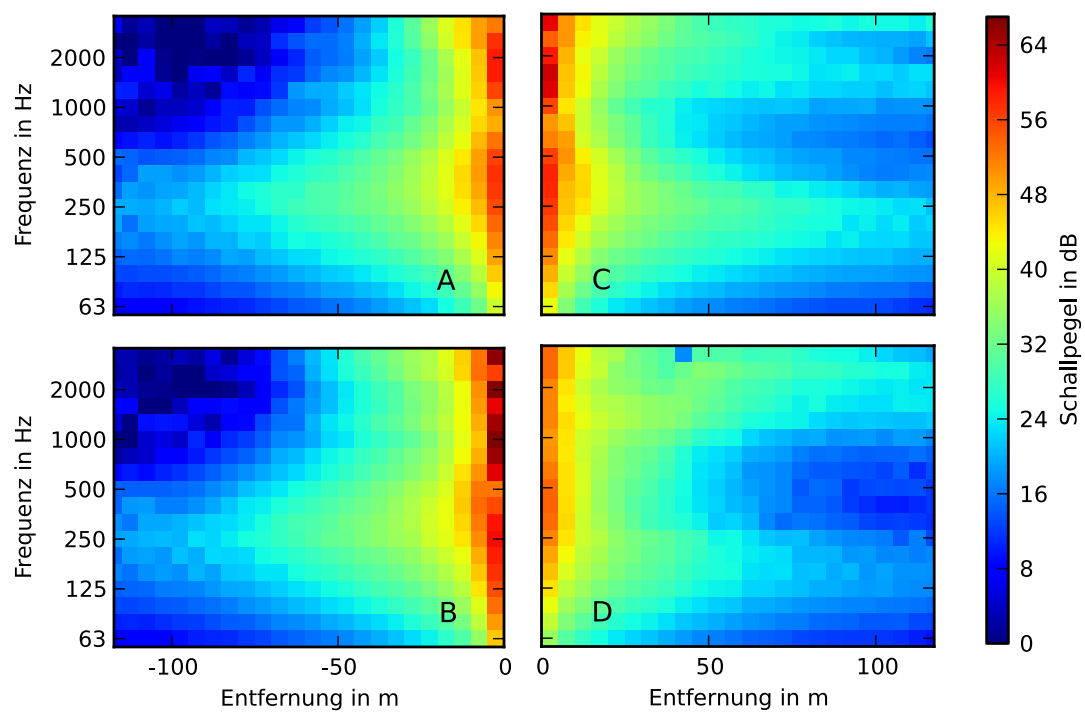


Abb. C.7.: Berechnete Schallspektren mit abgeschwächtem Wind, Horizontalschnitt in 1.5 m Höhe über Grund, A-bewerteter Schallpegel gemäß der Farbskala in dB

Symbolverzeichnis

Römische Symbole

a	Radius des Zylinders bzw. des Stamms
A_{Boden}	Schalldämpfung aufgrund Bodenreflexion
A_{Geo}	Schalldämpfung aufgrund geometrischer Abschwächung
A_{Ges}	Gesamtdämpfung während der Schallausbreitung
A_{Luft}	Schalldämpfung aufgrund Luftabsorption
A_{Meteo}	Schalldämpfung aufgrund meteorologischer Bedingungen
A_{Wald}	Schalldämpfung aufgrund Waldeffekte
$A_{\text{Wald,dir}}$	Schalldämpfung aufgrund direkter Waldeffekte
$A_{\text{Wald,ind}}$	Schalldämpfung aufgrund indirekter Waldeffekte
c	Schallgeschwindigkeit
$c_{1,2}$	Koeffizienten einer Funktion
c_d	Luftwiderstandsbeiwert
c_{eff}	effektive Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls
c_p	spezifische Wärmekapazität der Luft unter konstantem Druck
D_S	Stammdichte eines Waldes in Anzahl der Stämme/m ²
d_S	Durchmesser eines Baumstamms oder Breite eines Hindernisses
$d_{S,\text{eff}}$	effektiver Stammdurchmesser eines Baumes
E_E	emittierte Schallenergie
E_R	reflektierte Schallenergie
E_T	transmittierte Schallenergie
E_U	unerfasste Schallenergie
F	Verlustfaktor (engl. boundary loss factor) der Bodenreflexion
f	Schallfrequenz

f	Ausdruck einer Funktion
g	Schwerebeschleunigung
H	Hankel-Funktion
I_E	Intensität des einfallenden Schalls
I	Schallintensität
I_R	Intensität des rückgestreuten Schalls
J	Bessel-Funktion
k_0	Wellenzahl in der Luft
k_B	Wellenzahl im Boden
L_{eq}	äquivalenter Schalldruckpegel
L_p	Schalldruckpegel
$L_{p,E}$	Schalldruckpegel am Emissionsort
$L_{p,I}$	Schalldruckpegel am Immissionsort
L_W	Schallleistungspegel
l_S	Schallweg im Wald
M	molare Masse eines Gases
\mathbf{n}	Normaleneinheitsvektor
n_c	Anteil des bewachsenen Waldgebiets
N_E	Anzahl der emittierten Schallpartikel
N_R	Anzahl der reflektierten Schallpartikel
N_T	Anzahl der transmittierten Schallpartikel
N_V	Anzahl der verlorenen Schallpartikel
P	Schallleistung
p	Schalldruck
p'	strömungsdynamische Schwankung des Luftdrucks im Eulerschen Gleichungssystem
\bar{p}	stationärer Anteil des Drucks im Eulerschen Gleichungssystem
p''	Schalldruck, die akustische Schwankung des Luftdrucks im Eulerschen Gleichungssystem
p_{eff}	Effektivwert des Schalldrucks
\hat{p}	Amplitude des Schalldrucks

p_{ref}	Bezugsgröße des Schalldrucks
R	Gaskonstante
r	Länge des Schallwegs zwischen der Quelle und dem Empfänger
R_p	Reflexionskoeffizient
R_S	Stammdradius
S	Fläche
T	Temperatur
\mathbf{u}	Windvektor
$\bar{\mathbf{u}}$	stationärer Anteil des Windvektors im Eulerschen Gleichungssystem
\mathbf{u}'	strömungsdynamische Schwankung des Windvektors im Eulerschen Gleichungssystem
\mathbf{u}''	Schallschnelle, die akustische Schwankung des Windvektors im Eulerschen Gleichungssystem
u_h	horizontale Komponente der Windgeschwindigkeit
u_m	mittlere Windgeschwindigkeit
W	Walddichte in Anzahl der Stämme/m ²
\mathbf{x}	Ortsvektor
z	Höhe über Grund
Z_0	Schallimpedanz der Luft
Z_B	Schallimpedanz des Bodens
Z_S	Schallimpedanz des Stamms

Griechische Symbole

α_{Luft}	Absorptionskoeffizient der Luft
β	Reflexionsgrad
β_S	Reflexionsgrad eines Stamms
$\Delta l_{x,y,z}$	Maschenweite des Rechengitters in x -, y - und z -Koordinate
ε_R	Fehler einer Schätzfunktion für Reflexion
ε_T	Fehler einer Schätzfunktion für Transmission
Γ	trockenadiabatischer Temperaturgradient
γ	feuchtadiabatischer Temperaturgradient
γ_m	Phasenverschiebungswinkel

κ	Adiabatexponent eines Gases
κ	von Karmansche Konstante
λ	Wellenlänge
∇	Nabla-Operator
Ω	Krümmungsgrad des Schallstrahls bei Brechung
ω	Kreisfrequenz
ϕ	Streuwinkel in Bezug auf den einfallenden Schallstrahl
Φ_{FA}	Frontflächenanteil eines Baumes
Φ_{V}	Volumenanteil eines Baumes
Φ_{W}	flächenbezogene Walddichte
ρ_0	Luftdichte
σ	spezifischer Strömungswiderstand eines Bodens
Θ	potenzielle Lufttemperatur
θ	Ein- bzw. Ausfallswinkel der Schallstrahlen an der Oberfläche
ϑ_{m}	mittlere Windrichtung

Abbildungsverzeichnis

2.1. Skizze über Dämpfungsprozesse der gesamten Waldeffekte	7
2.2. Dämpfung durch geometrische Ausbreitung in Abhängigkeit von der Entfernung	11
2.3. Absorptionskoeffizient der Luft α_{Luft} in Abhängigkeit von der Frequenz .	12
2.4. Skizze der Bodenreflexion	12
2.5. Verhalten der Schallstrahlen und der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} unter verschiedenen meteorologischen Bedingungen	15
2.6. Waldeinflüsse auf die Windgeschwindigkeit u und die (potenzielle) Lufttemperatur Θ	16
2.7. Intensitätsverteilung der Streuung von ebenen Wellen am Zylinder	17
2.8. Reflektionsfaktor R_p der Streuung von kugelförmigen Wellen am Zylinder in Abhängigkeit von der Frequenz	18
2.9. Vergleich der simulierten und der mit der Streutheorie (Embleton, 1966) berechneten Dämpfungskoeffizienten eines idealisierten Waldes, in Abhängigkeit von ka	19
2.10. Beispiel von Schallausbreitung im Schallpartikelmodell im Horizontalschnitt	22
3.1. Skizze über Dämpfungsprozesse der in Kapitel 3 berücksichtigten Baumeffekte	25
3.2. Skizze des Rechengebiets über die Schallausbreitung an einzelnen Bäumen	27
3.3. Skizze möglicher Verläufe der Wellenausbreitung an einzelnen Bäumen innerhalb einer begrenzten Laufzeit	28
3.4. Vergleich der aufgenommenen Schalldrücke an den Mikrofonarrays V und H in einer Referenzrechnung	28
3.5. Übersicht der Bäume aus Voxeldaten der Laserscanning-Messungen . . .	29
3.6. Struktur der auf das akustische Rechengitter übertragenen Bäume	30
3.7. Parameter und Struktur der künstlich erzeugten Bäume	31
3.8. Parameter und Struktur der idealisierten Bäume	32
3.9. Momentaufnahme der Wellenausbreitung an der Platane	32
3.10. Spektrum der Reflexion und Transmission an der Platane	33
3.11. Skizze über die Diskretisierung mit unterschiedlichen Auflösungen	34
3.12. Spektrum der relativen Reflexion und Transmission an der Platane in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen	34
3.13. Räumliche Verteilung der relativen Reflexion und Transmission an der Platane	35
3.14. Vertikale Verteilung der relativen Reflexion und Transmission	36

3.15. Spektrum der relativen Reflexion und Transmission an den lasergescannten Baumstrukturen	37
3.16. Spektrum der relativen Reflexion und Transmission an den baumähnlichen Strukturen	38
3.17. Spektrum der relativen Reflexion und Transmission an den zylindrischen Strukturen	39
3.18. Spektrum der relativen Reflexion und Transmission an den würfelförmigen Strukturen	40
3.19. Verhältnis des Volumenanteils zum Frontflächenanteil der untersuchten Testobjekte	42
3.20. Schallpegel der relativen Reflexion in Abhängigkeit vom Volumen- bzw. Frontflächenanteil der untersuchten Testobjekte	43
3.21. Schallpegel der relativen Transmission in Abhängigkeit vom Volumen- bzw. Frontflächenanteil der untersuchten Testobjekte	43
3.22. Erfasste Energie anhand der Regressionsfunktionen in Abhängigkeit vom Volumenanteil	45
4.1. Skizze über Dämpfungsprozesse der in Kapitel 4 berücksichtigten Waldeffekte	48
4.2. Rechengebiet des Schallpartikelmodells auf der horizontalen Ebene . . .	49
4.3. Häufigkeitsverteilung der transmittierten und reflektierten Schallpartikel .	50
4.4. Schallpegel der relativen Reflexion und Transmission gegenüber dem Stammradius bzw. der Walddichte	52
4.5. Schallpegel der relativen Reflexion und Transmission gegenüber der Walddichte	53
4.6. Schallpegel der relativen Reflexion und Transmission gegenüber der Walddtiefe	54
4.7. Schallpegel der relativen Reflexion und Transmission gegenüber dem Reflexionsgrad der Stämme	55
4.8. Vergleich der Rechenergebnisse des Partikelmodells und FDTD-Modells .	56
5.1. Landkarte des Messgeländes und Skizze des Versuchsaufbaus	60
5.2. Aufbau des Versuchsstands	61
5.3. Digitales Höhenmodell des Messortes	63
5.4. Meteorologische Messdaten in den Messperioden	65
5.5. Zeitverlauf der gemessenen, A-bewerteten Schallpegel über die Messperioden	65
5.6. Beispiel einer Spektralanalyse der Tonaufnahme	66
5.7. Berechnete Pegeldifferenz aufgrund der Bodenreflexion	69
5.8. Pegelverlauf zweier typischer Schallereignisse	70
5.9. Individuelle Auswahl des Kennwertes der Immissionspegel	71
5.10. Betrachtung hinsichtlich unterschiedlicher, effektiver Entfernungen der nördlichen Messstrecken	72
5.11. Normierte, gemessene Schallpegel in den Messperioden I bis IV	74
5.12. Abhängigkeit zwischen den gemessenen Dämpfungspegeln und projizierten Windgeschwindigkeiten	76

6.1. Skizze über Dämpfungsprozesse der in Kapitel 6 berücksichtigten Waldeffekte	81
6.2. Landnutzung zur Berechnung der Windfelder	83
6.3. Berechnete Windfelder im Horizontalschnitt	87
6.4. West-Ost Komponente des berechneten Windfeldes	88
6.5. Verteilung des berechneten Schallpegels im Vertikalschnitt, unter den Messbedingungen	89
6.6. Berechnete Dämpfung durch Luftabsorption	90
6.7. Berechnete Schalleistungsspektren an zwei Messpunkten	91
6.8. Berechnete Schalldruckspektren an den einzelnen Messpunkten	92
6.9. Spektrum der berechneten Ausbreitungsdämpfung in den einzelnen Messstrecken	92
6.10. Berechnete Schallspektren unter Messbedingungen in 1.5 m Höhe über Grund	93
6.11. Berechnete Schallspektren unter Messbedingungen in 4 m Höhe über Grund	94
6.12. Berechnete Schallspektren auf totalabsorbierendem Boden in 1.5 m Höhe über Grund	96
6.13. Berechnete Schallspektren in homogener Atmosphäre in 1.5 m Höhe über Grund	99
6.14. Berechnete Schallspektren ohne Effekte der Meteorologie in 1.5 m Höhe über Grund	99
6.15. Berechnetes Schallspektrum mit schallhärterem Boden in 1.5 m Höhe über Grund	101
6.16. Verteilung des berechneten Schallpegels im Vertikalschnitt, mit verschiedenen akustischen Bedingungen des Waldes	101
6.17. Berechnetes Schallspektrum mit vollständiger Windabschirmung im Wald in 1.5 m Höhe über Grund	102
6.18. Skizze der Simulation mit einer sich bewegenden Schallquelle	106
6.19. Verlauf der berechneten Schallpegel und der berechneten Windgeschwindigkeiten	107
7.1. Skizze über Dämpfungsprozesse der in Kapitel 7 berücksichtigten Waldeffekte	109
7.2. Skizze des Rechengebietes für die Schallausbreitung an einem Waldgebiet	110
7.3. Beispiel zweidimensionaler Gestaltung des Waldgebiets mit zufällig verteilten Quadraten	110
7.4. Beispiel der Gestaltung des idealisierten Waldgebiets	112
7.5. Idealisierte Waldgebiete und resultierte Schallfelder im Vertikalschnitt	114
7.6. Gestaltung der Waldgebiete T _c -22 und T _c -31	115
B.1. Gemessener Pegelverlauf in Messperiode I - Teil 1	123
B.2. Gemessener Pegelverlauf in Messperiode I - Teil 2	124
B.3. Gemessener Pegelverlauf in Messperiode II - Teil 1	124
B.4. Gemessener Pegelverlauf in Messperiode II - Teil 2	125
B.5. Gemessener Pegelverlauf in Messperiode III - Teil 1	125
B.6. Gemessener Pegelverlauf in Messperiode III - Teil 2	126

B.7. Gemessener Pegelverlauf in Messperiode IV - Teil 1	126
B.8. Gemessener Pegelverlauf in Messperiode IV - Teil 2	127
C.1. West-Ost Komponente des berechneten Windfeldes für die Messperiode II	129
C.2. West-Ost Komponente des berechneten Windfeldes für die Messperiode IV	130
C.3. West-Ost Komponente der berechneten Windfelder mit verstärktem und abgeschwächtem Wind	130
C.4. Berechnete Schallspektren mit labilerer Atmosphärensichtung ($\partial\Theta/\partial z = -1.35 \text{ K}/(100 \text{ m})$)	131
C.5. Berechnete Schallspektren mit stabilerer Atmosphärensichtung ($\partial\Theta/\partial z = -0.65 \text{ K}/(100 \text{ m})$)	132
C.6. Berechnete Schallspektren mit verstärktem Wind	132
C.7. Berechnete Schallspektren mit abgeschwächtem Wind	133

Tabellenverzeichnis

3.1. Äquivalenter Schallpegel der relativen Reflexion und Transmission an den lasergescannten Baumstrukturen	37
3.2. Äquivalenter Schallpegel der relativen Reflexion und Transmission an den baumähnlichen Strukturen	38
3.3. Äquivalenter Schallpegel der relativen Reflexion und Transmission an den idealisierten Baumstrukturen	41
3.4. Parameter zur Charakterisierung der Bäume	42
4.1. Übersicht der Sensitivitätsanalyse auf Stammdichte und Stammradius . . .	51
5.1. Positionierung der Mikrofone und Anzahl der gemessenen Ereignisse . . .	62
5.2. Entfernungen der Messpunkte zu den Gleisen	63
5.3. Geometrische Dämpfung in den einzelnen Messstrecken	67
5.4. Berechnete Luftdämpfung in den einzelnen Messstrecken	68
5.5. Strömungswiderstand σ verschiedener Bodentypen	68
5.6. Normierungsvorgänge und Korrekturpegel	73
5.7. Auswertung der Pegeldifferenz der Messmikrofone im Vergleich zu den Referenzmikrofonen	74
5.8. Gemessene Ausbreitungsdämpfung ΔL über die normierten Entfernungen	75
5.9. Vergleich der Messergebnisse aus dieser Arbeit und aus verschiedenen, vorherigen Studien	80
6.1. Statistische Auswertung der gemessenen Winddaten	84
6.2. Vergleich der gemessenen und berechneten Winddaten	88
6.3. Berechnete Ausbreitungsdämpfung unter den Messbedingungen	93
6.4. Berechnete Ausbreitungsdämpfung auf totalabsorbierendem Boden	96
6.5. Berechnete Ausbreitungsdämpfung in labiler und stabiler Atmosphärenschichtung	97
6.6. Berechnete Ausbreitungsdämpfung in stärkerem und schwächerem Windfeld	98
6.7. Berechnete Ausbreitungsdämpfung in homogener Atmosphäre	100
6.8. Konfiguration der Messungen und Simulationen	102
6.9. Gemessene und berechnete Ausbreitungsdämpfung unter den untersuchten Bedingungen	103
6.10. Berechnete Zusatzdämpfung aufgrund totaler Bodenabsorption	105
6.11. Berechnete Zusatzdämpfung aufgrund Unterdrückung der Meteorologie .	106
6.12. Berechnete Zusatzdämpfung aufgrund modifizierter Bedingungen im Waldgebiet	107

7.1. Übersicht über die Parameter zur Charakterisierung des Waldgebiets . . .	113
7.2. Berechnete Schalldämpfung im idealisierten Wald	114

Literaturverzeichnis

- Attenborough, K., 1982: Acoustical characteristics of porous materials. *Physics Reports*, 82(3):179–227. doi:10.1016/0370-1573(82)90131-4.
- Attenborough, K., 1985: Acoustical impedance models for outdoor ground surfaces. *Journal of Sound and Vibration*, 99(4):521–544.
- Attenborough, K., 1988: Review of ground effects on outdoor sound propagation from continuous broadband sources. *Applied Acoustics*, 24(4):289–319. doi:10.1016/0003-682X(88)90086-2.
- Aylor, D., 1972: Noise reduction by vegetation and ground. *Journal of the Acoustical Society of America*, 51(1):197–205.
- Bérenger, J.-P., 1994: A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics*, 114(1):185–200.
- Bérenger, J.-P., Stinson, M. R., Daigle, G. A., und Hamet, J. F., 1997: Porous road pavements: Acoustical characterization and propagation effects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 101(1):155–162. doi:10.1121/1.417998.
- Blumrich, R. und Heimann, D., 2002: A linearized eulerian sound propagation model for studies of complex meteorological effects. *Journal of the Acoustical Society of America*, 112:446–455.
- Blumrich, R. und Heimann, D., 2004: Numerical estimation of atmospheric approximation effects in outdoor sound propagation modelling. *Acta Acustica*, 90:24–37.
- Bolin, K., 2009: Prediction method for wind-induced vegetation noise. *Acta Acustica united with Acustica*, 95:607–619. doi:10.3813/AAA.918189.
- Breuer, L., Eckhardt, K., und Frede, H.-G., 2003: Plant parameter values for models in temperate climates. *Ecological Modelling*, 169:237–293.
- Bullen, R. und Fricke, F., 1982: Sound propagation through vegetation. *Journal of Sound and Vibration*, 80(1):11–23.
- Chessell, C. I., 1977: Propagation of noise along a finite impedance boundary. *Journal of the Acoustical Society of America*, 62(4):825–834.
- Cremer, L. und Möser, M., 2003: *Technische Akustik*. Springer, Berlin, 5. Auflage. ISBN 3-540-44249-9.

- Delany, M. E. und Bazley, E. N., 1970a: Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*, 3:105–116.
- Delany, M. E. und Bazley, E. N., 1970b: Monopole radiation in the presence of an absorbing plane. *Journal of Sound and Vibration*, 13(3):269–279.
- DIN 45633, 1966: Präzisionsschallpegelmesser.
- DIN 45641, 1990: Mittelung von Schallpegeln.
- DIN EN 13674-1, 2011: Bahnanwendungen — Oberbau — Schienen. Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m.
- DIN EN 29053, 1993: Materialien für akustische Anwendungen. Bestimmung des Strömungswiderstandes.
- DIN EN ISO 266, 1997: Normfrequenzen.
- DIN IEC 60651, 1994: Schallpegelmesser.
- DIN ISO 9613-1, 1993: Akustik - dämpfung des schalls bei der ausbreitung im freien. Teil 1: Berechnung der Schallabsorption durch die Luft.
- DIN ISO 9613-2, 1999: Akustik - dämpfung des schalls bei der ausbreitung im freien. Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren.
- EBO, 1967: Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung. Bundesrechtsverordnung.
- Ehrenfried, K., 2002: Strömungsakustik. Berlin. Vorlesungsskript, Technische Universität Berlin.
- Embleton, T. F. W., 1963: Sound propagation in homogeneous deciduous and evergreen woods. *Journal of the Acoustical Society of America*, 35(8):1119–1125.
- Embleton, T. F. W., 1966: Scattering by an Array of Cylinders as a Function of Surface Impedance. *Journal of the Acoustical Society of America*, 40:667–670.
- Embleton, T. F. W., Piercy, J. E., und Daigle, G. A., 1983: Effective flow resistivity of ground surfaces determined by acoustical measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*, 74(4):1239–1244.
- Eyring, C. F., 1946: Jungle acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 18:257–270.
- Fahy, F., 2001: *Foundations of engineering acoustics*. Academic Press, London UK. ISBN 0-12-247665-4.
- Fang, C.-F. und Ling, D.-L., 2003: Investigation of the noise reduction provided by tree belts. *Landscape and Urban Planning*, 63:187–195.
- Fégeant, O., 1999: Wind-induced vegetation noise. part ii: Field measurements. *Acta Acustica united with Acustica*, 85(2):241–249.

- Fricke, F., 1984: Sound attenuation in forests. *Journal of Sound and Vibration*, 92(1):149–158.
- Groß, G., 1985: An explanation of the maloja-serpent by numerical simulation. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre*, 58:441–457.
- Groß, G., 1987: Some effects of deforestation on nocturnal drainage flow and local climate — a numerical study. *Journal of Boundary-Layer Meteorology*, 38:315–337.
- Groß, G., 1993: *Numerical Simulation of Canopy Flows*. Springer, Berlin. ISBN 3-540-52520-3.
- Heimann, D., 2003: Numerical simulations of wind and sound propagation through an idealised stand of trees. *Acta Acustica united with Acustica*, 89:779–788.
- Heimann, D. und Karle, R., 2006: A linearized euler finite-difference time-domain sound propagation model with terrain-following coordinates. *Journal of the Acoustical Society of America*, 119(6):3813–3821.
- Heimann, D., Schady, A., und Feng, J., 2012: Atmospheric acoustics. In U. Schumann (Herausgeber), *Atmospheric Physics*, Kapitel 13. Springer, 203–217. doi:10.1007/978-3-642-30183-4.
- Heutschi, K., Horvath, M., und Hofmann, J., 2005: Simulation of ground impedance in finite difference time domain calculations of outdoor sound propagation. *Acta Acustica united with Acustica*, 91:35–40.
- Hornikx, M., Botteldooren, D., Van Renterghem, T., und Forssén, J., 2011: Modelling of scattering of sound from trees by the PSTD method. In *Forum Acusticum 2011*. European Acoustics Association, Aalborg, Denmark. ISSN 2221-3767, 839–844.
- Huisman, W. H. T. und Attenborough, K., 1991: Reverberation and attenuation in a pine forest. *Journal of the Acoustical Society of America*, 90(5):2664–2677.
- Ingard, U., 1951: On the reflection of a spherical sound wave from an infinite plane. *Journal of the Acoustical Society of America*, 23(329).
- Kragh, J., 1979: Pilot study on railway noise attenuation by belts of trees. *Journal of Sound and Vibration*, 66(3):407–415.
- Kragh, J., 1981: Road traffic noise attenuation by belts of trees. *Journal of Sound and Vibration*, 74(2):235–241.
- Martens, M. J. M., 1980: Foliage as a low-pass filter: Experiments with model forests in an anechoic chamber. *Journal of the Acoustical Society of America*, 67(1):66–72. doi:10.1121/1.383790.
- Martens, M. J. M. und Michelsen, A., 1981: Absorption of acoustic energy by plant leaves. *Journal of the Acoustical Society of America*, 69(1):303–306. doi:10.1121/1.385313.

- Martens, M. J. M., Severens, P. P. J., Van Wissen, H. A. W. M., und Van der Heijden, L. A. M., 1985: Acoustic reflection characteristics of deciduous plant leaves. *Environmental and Experimental Botany*, 25(3):285–292. doi:10.1016/0098-8472(85)90013-9.
- Martínez-Sala, R., Rubio, C., García-Raffi, L. M., Sánchez-Pérez, J. V., Sánchez-Pérez, E. A., und Llinares, J., 2006: Control of noise by trees arranged like sonic crystals. *Journal of Sound and Vibration*, 291(1–2):100–106. doi:10.1016/j.jsv.2005.05.030.
- Morse, P. M. und Ingard, K. U., 1968: *Theoretical Acoustics*. Mc Graw-Hill.
- Pal, A. K., Kumar, V., und Saxena, N. C., 2000: Noise attenuation by green belts. *Journal of Sound and Vibration*, 234(1):149–165. doi:10.1006/jsvi.2000.2863.
- Piercy, J. E., Embleton, T. F. W., und Sutherland, L. C., 1977: Review of noise propagation in the atmosphere. *Journal of the Acoustical Society of America*, 61(6):1403–1418.
- Price, M. A., Attenborough, K., und Heap, N. W., 1988: Sound attenuation through trees: Measurements and models. *Journal of the Acoustical Society of America*, 84(5):1836–1844.
- Queck, R., Bienert, A., Maas, H.-G., Harmansa, S., Goldberg, V., und Bernhofer, C., 2011: Wind fields in heterogeneous conifer canopies: parameterisation of momentum absorption using high-resolution 3d vegetation scans. *European Journal of Forest Research*. doi:10.1007/s10342-011-0550-0. Published online.
- Reethof, G., 1973: Effect of plantings on radiation of highway noise. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 23(3):185–189.
- Rudnick, I., 1947: The propagation of an acoustic wave along a boundary. *Journal of the Acoustical Society of America*, 19:348–356.
- Scurlock, J. M. O., Asner, G. P., und Gower, S. T., 2001: Worldwide historical estimates of leaf area index, 1932–2000. doi:10.3334/ORNLDAAAC/584. ORNL Technical Memorandum TM-2001/268.
- Sutherland, L. C. und Daigle, G. A., 1997: *Atmospheric Sound Propagation*, Band 1, Kapitel 32. John Wiley & Sons, 341–365.
- Swearingen, M. E. und White, M. J., 2007: Influence of scattering, atmospheric refraction, and ground effect on sound propagation through a pine forest. *Journal of the Acoustical Society of America*, 122(1):113–119.
- Sánchez, J. V., Caballero, D., Martínez-Sala, R., Sancho, J., Rubio, C., Sánchez-Dehesa, J., Meseguer, F., Llinares, J., und Gálvez, F., 1998: Sound attenuation by a two-dimensional array of rigid cylinders. *Physical Review Letters*, 80(24):5325–5328.
- Twersky, V., 1952: Multiple scattering of radiation by an arbitrary configuration of parallel cylinders. *Journal of the Acoustical Society of America*, 24(1):42–47.
- Twersky, V., 1964: Acoustic bulk parameters of random volume distributions of small scatterers. *Journal of the Acoustical Society of America*, 36(7):1314–1329.

- Van Renterghem, T., Botteldooren, D., und Verheyen, K., 2012: Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth. *Journal of Sound and Vibration*. doi: 10.1016/j.jsv.2012.01.006. Article in press.
- VBUSch, 2006: Vorläufige berechnungsmethode für den umgebungs-lärm an schienenwegen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Vorläufige Berechnungsmethode für den Umgebungslärm nach § 5 Abs. 1 der Verordnung über die Lärmkartierung (34. BImSchV).
- VDI 2714, 1988: Schallausbreitung im freien. VDI-Richtlinien. Verein Deutscher Ingenieure.
- Wunderli, J. M., 2009: A model to predict the sound reflection from forests. *Acta Acustica united with Acustica*, 95:76–85.
- Wunderli, J. M., 2012: An extended model to predict reflections from forests. *Acta Acustica united with Acustica*, 98:263–278.
- Wunderli, J. M. und Salomons, E. M., 2009: A model to predict the sound reflection from forests. *Acta Acustica united with Acustica*, 95:76–85.
- Yang, H.-S., Kang, J., Cheal, C., Van Renterghem, T., und Botteldooren, D., 2013: Quantifying scattered sound energy from a single tree by means of reverberation time. *Journal of the Acoustical Society of America*, 134:264–274. doi:10.1121/1.4808175.
- Zwikker, C. und Kosten, C. W., 1949: *Sound absorbing materials*. Elsevier, New York.

Danksagung

Die vorliegende Doktorarbeit wurde während meiner Tätigkeit am Institut für Physik der Atmosphäre (IPA) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) angefertigt. Für das Gelingen dieser Arbeit möchte ich mein Dankeswort an die folgenden Personen richten.

Meinem Abteilungsleiter und dem Drittgutachter, Herrn Prof. Dr. Robert Sausen, danke ich ganz herzlich für die Begleitung meiner Forschungsarbeit und insbesondere für die intensive Betreuung beim Abschluss dieser Arbeit. Herrn Prof. Dr. Sesterhenn und Herrn Dr. Klaus Ehrendfried danke ich für die Betreuung meiner Arbeit und die Übernahme des ersten bzw. zweiten Gutachtens.

Herr Dr. Dietrich Heimann und Herr Dr. Arthur Schady im DLR-IPA haben mich mit Ihren ideenreichen Anregungen in der fachlichen Diskussion und Ihrer fortwährenden Motivierung unterstützt. Hierfür möchte ich mich recht herzlich bedanken.

Ich danke vielmals meinen Kollegen in der Abteilung Dynamik der Atmosphäre im Institut für die fachlichen Ratschläge. Herrn Winfried Beer danke ich sehr für die EDV-Betreuung.

Mein besonderer Dank gilt für Frau Dr. Anne Bienert für die Zurverfügungstellung der Laserscanning-Messdaten.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie in Taiwan und in Deutschland. Ihre unermüdliche Aufmunterung gab mir immer wieder neue Energie und Inspiration, die Herausforderungen zu bewältigen.